



**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA RESOLVER PROBLEMAS
DE LOCALIZACIÓN EN UNA CADENA DE SUMINISTROS DE PRODUCTOS
PERECEDEROS BAJO LA METODOLOGÍA CROSS DOCKING**

**MARIO ANDRÉS ZULETA VARELA 624664
CARLOS ERNESTO SANDOVAL ARDILA 624669**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA DE SISTEMAS
BOGOTÁ D.C.**

2020

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA RESOLVER PROBLEMAS
DE LOCALIZACIÓN EN UNA CADENA DE SUMINISTROS DE PRODUCTOS
PERECEDEROS BAJO LA METODOLOGÍA CROSS DOCKING.**

Mario Andrés Zuleta Varela
Carlos Ernesto Sandoval Ardila

ESTE TRABAJO DE GRADO ES PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE SISTEMAS

ASESOR: ROGER ENRIQUE GUZMÁN AVENDAÑO M. SC (C). INGENIERÍA
DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

ALTERNATIVA: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN: GISIC
SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN: MAILAB

BOGOTÁ D.C. 2020



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5 CO)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia visita:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>



Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la [misma licencia](#) del original.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de aceptación

aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la facultad de ingeniería y la universidad católica de Colombia para optar al título de ingeniero de sistemas.

Fernando Pérez González

Jurado 2

Roger Erique Guzmán Avendaño, msc.

Asesor

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestros padres, por forjarnos como personas valientes, resilientes y soñadoras; son el motor de nuestra motivación y alegría de cada logro.

A nuestros hermanos, por su apoyo incondicional y aliento; por tener la ocasión de representarlos y guiarlos al mejor camino con el ejemplo de un logro.

A Dios, por todas las angustias que le dimos a conocer, aunque él no nos contestó con palabras, nos respondió con hechos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de forma especial a nuestras familias, pues fueron el impulso para construir nuestra vida profesional, al darnos fortaleza y ejemplos de vida para ser personas maravillosas.

A Dios, por brindarnos la sabiduría y ser resiliente, al no rendirnos, a pesar de los obstáculos continuos de la vida; por bendecir cada oportunidad y reto de este camino.

CONTENIDO

1	Introducción	143
2	Generalidades	154
2.1	Antecedentes	154
2.2	Planteamiento del problema	154
3	Objetivos	176
3.1	Objetivo general	176
3.2	Objetivos específicos	176
4	Justificación	187
5	Alcance y limitaciones	209
5.1	Alcance	209
5.2	Limitaciones	209
5.3	Espacio	209
5.4	Tiempo	209
6	Marco referencial	20
6.1	Marco conceptual	20
6.1.1	Cadena de suministros	20
6.1.2	Etapas de una cadena de suministros	20
6.1.3	Flujos de una cadena de suministros	22
6.1.4	Efecto látigo	22
6.1.5	Cross docking	23
6.1.6	Programación lineal	243
6.1.7	Heurísticas	254
6.1.8	Meta heurísticas	254
6.1.9	Algoritmos genéticos	254
6.1.10	Ramificación	265
6.2	Marco teórico	29
6.2.1	Supermercado Walmart	309
6.2.2	Almacenes Éxito	309
6.2.3	Bimbo	321
6.2.4	Empresa Tecnoquímicas (TQ)	332
7	Desarrollo de la propuesta	354
7.1	Estado del arte	354
7.2	Las decisiones de ubicación de instalaciones en la cadena de suministro	454

7.3	Modelamiento matemático del algoritmo	476
7.4	Implementación del algoritmo	521
7.5	Cálculo de la complejidad computacional	554
8	Metodología	565
9	Conclusiones	576
9.1	Objetivo 1	576
9.2	Objetivo 2	576
9.3	Objetivo 3	576
10	Cronograma	587
11	Productos a entregar	609
12	Instalaciones y equipo requerido	60
13	Presupuesto del trabajo	621
14	Referencias bibliográficas	632
15	Bibliografía	632

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1. Cálculo de las rutas de menor costo	43
Algoritmo 2. Cálculo de función objetivo	44
Algoritmo 3. Procedimiento check()	44
Algoritmo 4. Procedimiento búsqueda local LS()	45

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Gestión de la cadena de suministros en un contexto de globalización</i>	15
<i>Figura 2. Modelo básico Cross Docking</i>	16
<i>Figura 3. Cadena de suministro</i>	21
<i>Figura 4. Cómo utilizar los estándares EAN.UCC</i>	23
<i>Figura 5. Los estándares de los usuarios EAN.UCC</i>	24
<i>Figura 6. Optimización programación lineal</i>	24
<i>Figura 7. Desarrollo de un árbol mediante una estrategia FIFO</i>	28
<i>Figura 8. Desarrollo de un árbol mediante una estrategia LIFO</i>	29
<i>Figura 9. Territorio apropiado por Walmart</i>	30
<i>Figura 10. Red logística a nivel nacional Éxito</i>	31
<i>Figura 11. Logística de almacenamiento Éxito de Cross Docking</i>	32
<i>Figura 12. Modelo de distribución Bimbo</i>	33
<i>Figura 13. Avance Nacional TQ</i>	33
<i>Figura 14. Distribución Nacional TQ</i>	34
<i>Figura 15. Flujo metodológico</i>	56
<i>Figura 16. Diagrama de Gantt</i>	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Casos industriales documentados de efecto látigo</i>	22
Tabla 2. <i>Cronograma</i>	58
Tabla 3. <i>Productos a entregar</i>	60
Tabla 4. <i>Presupuesto global del anteproyecto</i>	62

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación es implementar un algoritmo de tipo heurístico; el cual genere, mediante un análisis matemático, una solución óptima a los problemas de localización encontrados en las diferentes empresas de distribución de alimentos perecederos que utilizan la metodología *Cross Docking* (CD).

Estos problemas de localización tienen una constitución de un problema combinatorial, debido a las diferentes variables que se deben tener en cuenta. Por ende, se produce un contexto de problema NP y NP-*hard* que las máquinas de *turing*, o computadores, no son posibles de solucionar.

Con esta tesis, se busca reducir, a partir de un algoritmo, la complejidad computacional del problema a un problema P y, de esta manera, contribuir con una solución acorde para que las empresas, cuando contemplen la localización o el reemplazo de instalaciones de Centros de Distribución (CEDIS), no vean afectadas sus finanzas y tiempos de ejecución por una mala decisión o por el cierre de uno de sus CEDIS.

Se resalta que este tipo de inconvenientes suelen ser frecuentes y generan una gran problemática para las empresas por la incertidumbre producida al momento de tomar estas decisiones.

Palabras clave

Cross docking, cadena de suministros, centros de distribución, algoritmos, eficiencia, complejidad computacional.

ABSTRACT

The objective of this research work is to implement a Heuristic type algorithm. Which, through a mathematical analysis, provides an optimal solution to the location problems found in the different perishable food distribution companies that use the CD methodology.

These location problems have a constitution of a combinatorial problem due to the different variables that must be taken into account. Therefore, an NP and NP-hard problem context is produced, and it is known that, for Turing machines, or computers it is not possible to solve.

What is sought with this thesis is, by means of an algorithm, to reduce the computational complexity of the problem to a problem P, and in this way contribute to providing an optimal solution for companies, when considering the location or replacement of facilities of centers of distribution, their finances and execution times are not affected by a bad decision or by the closure of one of their distribution centers.

Since these types of inconveniences are usually frequent, and generate a great problem for companies, due to the uncertainty produced when making these decisions.

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos logísticos representan un punto importante de los costos dentro de una empresa. Por lo tanto, el diseño de una red eficiente es determinante para la competitividad de la compañía en el mercado; estas se preocupan por la distribución para que satisfaga el crecimiento y la necesidad de los clientes a un corto o mediano plazo.

Dentro de estas redes logísticas, uno de los principales conceptos son las cadenas de suministros y los diferentes CEDIS y almacenes intermedios; los cuales utilizan una metodología de distribución CD.

Para ello, se debe tener en cuenta un gran número de variables antes de planificar o tomar decisiones respecto al impacto costo beneficio de la localización de nuevos CEDIS, como lo son el tiempo, el espacio geográfico, el clima, la densidad poblacional, el tipo de producto a distribuir, la distancia entre punto y punto, y la demanda del producto.

Con este proyecto, se pretende implementar un algoritmo que permita que las empresas distribuidoras de alimentos perecederos manejen un sistema CD y tomen decisiones con base en los resultados de un algoritmo diseñado mediante un análisis matemático previo. De igual forma, se espera que, a partir del modelamiento y el uso de cálculos matemáticos y probabilísticos, se seleccionen los puntos adecuados en una determinada zona geográfica para la apertura de nuevos CEDIS, mientras la empresa tiene la seguridad que dicha ubicación cuenta con tiempos de distribución y costo óptimos que satisfacen sus necesidades.

En este sentido, con el motivo de simplificar la complejidad computacional de un análisis de este tipo, entendiendo que, al contemplar más variables, las posibles combinaciones se vuelven exponenciales; se busca dar solución a una compañía de distribución de alimentos perecederos. Para ello, se eliminan las variables de espacio geográfica, el clima y la densidad poblacional, a la par que el análisis matemático se centra en los tiempos de distribución, el almacenamiento de los alimentos, la distancia entre puntos y la demanda del producto.

Como síntesis, síntesis, se puede decir que este proyecto procura facilitar las decisiones y los impactos económicos para las empresas, mientras garantiza que el dinero invertido para la implementación del nuevo CEDIS es adecuado y que este no generará pérdidas, sino un valor a la empresa.

2 GENERALIDADES

2.1 ANTECEDENTES

Los grupos de empresas evaluados en el 2001 por el Observatorio de la Empresa Multinacional Española (OEME), tenían en cuenta varias posibilidades al momento antes de realizar la instalación de un nuevo CEDIS o almacén. La primera opción que contemplaban era implementar estrategias y flujos probados con otras compañías y que fueron exitosos en su momento. Este tipo de prácticas no aseguraban un éxito, debido a las variables que influyen en cada uno de los escenarios, como costos, inventarios, rutas.

La otra opción que tomaban las compañías era considerar una serie de variables cuantitativas que determinaban la viabilidad de estos nuevos puntos. Estas variables se evaluaron mediante estudios contratados en intervalos de tiempo en los cuales se realizaba una serie de acciones para conseguir la información necesaria. Estos estudios representan un presupuesto elevado para las compañías, lo cual se convertía en gran riesgo para estas y se generaba un escenario de prueba y error.

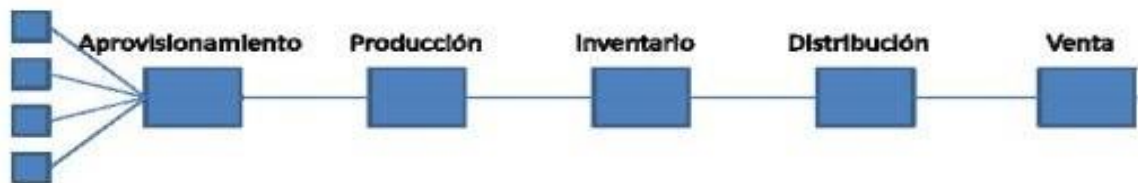


Figura 1. Gestión de la cadena de suministros en un contexto de globalización

Fuente: (OBSERVATORIO DE LA EMPRESA MULTINACIONAL ESPAÑOLA [OEME], 2011)

La Figura 1 hace referencia al flujo de una cadena de suministros local, propuesta por el OEME, en la que el objetivo es ver cómo evoluciona la cadena de suministros en cada una de sus etapas. Así, se identificaron las prácticas de gestión de la cadena de suministros, así como sus ventajas y desventajas.

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para una empresa que use cadenas de suministros para la distribución de sus productos, es crítico el momento en el cual su productividad se ve afectada los problemas generados en sus almacenes intermedios, ya sea por su ubicación, por las distancias con otros CEDIS, la poca productividad en la zona o las demoras en los tiempos por complejidad de acceso.

Lo mencionado, puede llevar a una decisión por parte de la compañía, como cerrar estos puntos. Esto acarrea unos costos tanto de mala implementación,

entre ellos, los de desmonte y de traslado de un punto a otro.

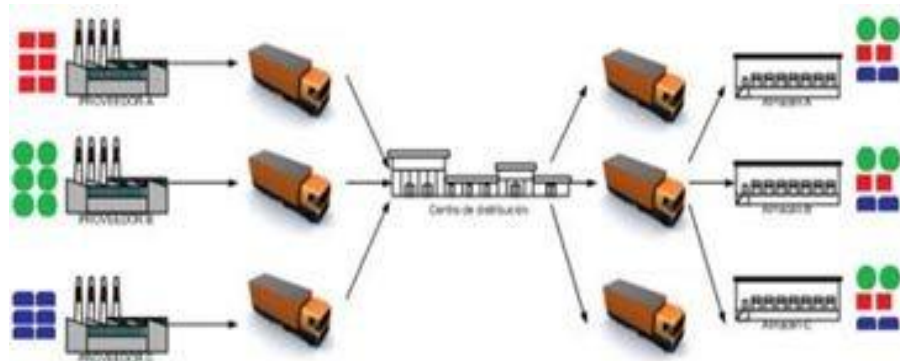


Figura 2. Modelo básico Cross Docking

Fuente: (UNKNOWN, 2015)

En la actualidad, las empresas se rigen por su competitividad y eficiencia frente a otras compañías, mientras priorizan los bajos costos y optimizan los tiempos de entrega. En el escenario en el que la empresa se dedique a distribuir productos perecederos, el tiempo entra a ser prioridad y parte importante para la compañía. Por estas razones, la ubicación de un nuevo punto o el traslado de uno existente es una decisión primordial que determina el éxito o fracaso de un proyecto.

Las empresas que distribuyen alimentos perecederos en Bogotá deben centrar su análisis en los tiempos mínimos del proceso en su cadena de suministro. Por esta razón, la metodología CD se acomoda a la perfección en dicho problema, puesto que su producción está centra en minimizar los tiempos de entrega al cliente final, reduciendo o eliminando el almacenamiento en *stock* del producto.

Sin embargo, al tratarse de un área extensa geográficamente, las posibles combinaciones entre CEDIS actuales y los planeados por las compañías (evaluando variables de distancia, tiempos de transporte, tiempo de caducidad de productos, etc.), hacen computacionalmente costoso resolver este tipo de problemas de crecimiento exponencial (NP o NP-H).

Esta clase de problemáticas en la literatura se evalúan a partir del uso de algoritmos heurísticos con los que se busca reducir su complejidad y volverlos problemas P. En este proceso, se evalúa un conjunto de posibles soluciones para encontrar una que satisfaga a las necesidades descritas.

Este contexto lleva cuestionarse de qué forma se puede automatizar el hecho de apoyar la toma de decisiones de la ubicación o localización de un nuevo punto de distribución en planta para productos perecederos en empresas que utilicen la metodología CD, mientras se tiene en cuenta la complejidad de estos problemas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un algoritmo de optimización para la localización de CEDIS para empresas distribuidoras de alimentos perecederos que manejan la metodología CD.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un estado del arte que permita identificar los tipos de algoritmos que son usados para resolver problemas de localización dentro de una cadena de suministro que emplea la metodología CD.
- Modelar matemáticamente un algoritmo de optimización que posibilite resolver problemas de localización dentro de una cadena de suministro con la metodología CD.
- Analizar la complejidad computacional del algoritmo de optimización de manera que permita resolver problemas de localización dentro de una cadena de suministro que utilice la metodología CD.

4 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se centra en el estudio de los problemas de ubicación para una sucursal de una cadena logística, debido a que las diferentes empresas que distribuyen sus alimentos mediante cadenas logísticas ven afectadas, en gran medida, sus inversiones, pues no tienen certeza y basan sus decisiones en el análisis de mercado y encuestas cuando necesitan implementar un nuevo CEDIS. Con ello, generan un resultado incierto, el cual genera cierres y pérdidas en muchas ocasiones.

Cuando ocurren cierres inesperados que son forzados por los costos y tiempos no planificados de los almacenes intermedios, se genera una pérdida de tiempo y de dinero para las compañías, además de los trámites y las consecuencias que acarrea el cierre de un almacén intermedio.

La necesidad de este estudio surge pues, al tratarse de productos perecederos, los tiempos de almacenamiento y las distancias que recorre cada producto para llegar a su cliente final tienen que ser mínimos. Por ello, este estudio indica cuál sería la ubicación de la siguiente sucursal conveniente para la planificación de una cadena de suministros con diferentes CEDIS y almacenes intermedios. A partir de unas variables de distancia, tiempo de desplazamiento y tiempo de almacenamiento máximo de productos; con el fin de simplificar los pasos de aprovisionamiento, producción y distribución.

Con el propósito de reducir los costos totales y maximizar los activos mínimos para diferentes puntos, se utiliza la metodología CD, debido a que esta centra su funcionamiento en la búsqueda de la optimización de tiempos de distribución, desde la fabricación del producto, hasta la entrega final con el cliente. De esta manera, se ayuda a la empresa a alcanzar una ventaja competitiva; un objetivo que se consigue gracias a la mejora de la eficiencia y a la planificación o la productividad adecuada. Esto conllevaría a un modelo de distribución especialmente rápido y rentable y una reducción interesante de costos en el almacenaje, la distribución, el inventario y el personal.

De este modo, “Al reducir los *stocks*, facilita la tarea de manipulación y reubicación de la mercancía”.¹ Asimismo, genera “[...] una mayor frescura de la mercancía y aumenta su disponibilidad”,² a la par que facilita el cumplimiento de los plazos fijados, lo que supone una ventaja para el cliente.

Al finalizar el proceso, se garantiza que el algoritmo encontrará una localización óptima y viable para el nuevo CEDIS. Con esto, se reduce la incertidumbre y el impacto que generan este tipo de decisiones en las compañías, el cual representa inversiones económicas delicadas para los propietarios, socios o las juntas directivas. A su vez, permitirá que los clientes finales tengan sus productos perecederos con un mayor margen de tiempo antes de su caducidad, lo que ayuda al bienestar, la tranquilidad y la eficiencia no solo de las empresas, sino

¹ BERNARDINO . (s.f.). Cross-docking: Funciones y Tipos [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://bernardinoabad.es/2019/07/26/cross-docking-funciones-y-tipos/>. párr. 15.

² Ibid. párr. 16.

de los diferentes actores dentro del mercado de alimentos: almacenes minoristas, mayoristas, usuario final y demás.

5 ALCANCE Y LIMITACIONES

5.1 ALCANCE

Se realiza un análisis matemático y el desarrollo de un algoritmo para la identificación de las localizaciones de las plataformas CD, de los CEDIS y de los almacenes intermedios; también, las cantidades enviadas entre los diversos puntos que minimizan los costos totales fijos y variables. Dicho algoritmo se realiza utilizando el software Python durante el periodo académico 2019-I en la Universidad Católica de Colombia.

5.2 LIMITACIONES

- Los productos a distribuir son alimentos perecederos.
- La metodología que se tiene en cuenta en la cadena de suministros es el CD.
- Un producto no podrá estar contenido por más de 24 horas en *stock*.

5.3 ESPACIO

El proyecto está diseñado para ser desarrollado en Bogotá.

5.4 TIEMPO

El tiempo total para la implementación son seis meses.

6 MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO CONCEPTUAL

6.1.1 Cadena de suministros

Una cadena de suministros se puede definir como todos los entes que intervienen en el proceso de un determinado producto, desde la extracción de la materia prima, hasta su entrega como producto a un cliente final. En la Figura 3, se aprecia un ejemplo de cadena de suministros:

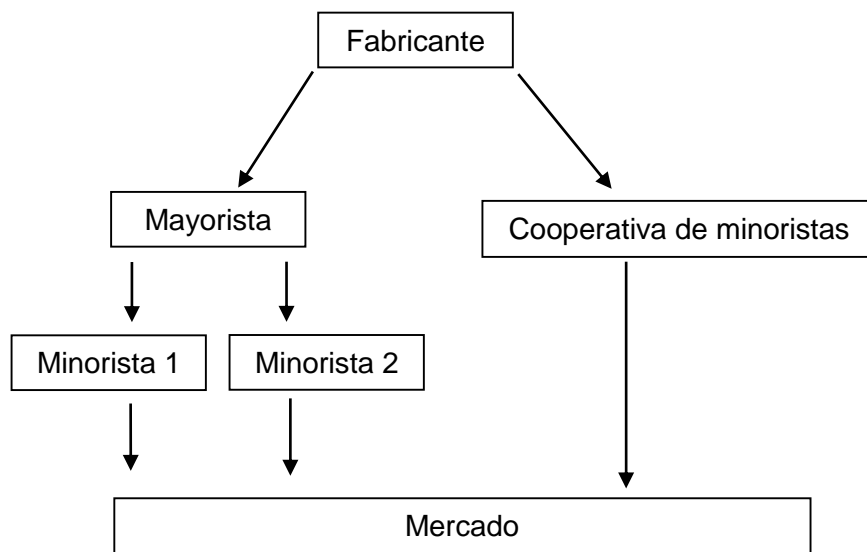


Figura 3. Cadena de suministro

Fuente: (MARTÍN-ANDINO, 2006)

Todas las entidades se relacionan de forma directa o indirecta. En la Figura 3, se toma el proceso hasta la llegada de un producto al mercado, pero se excluyen una gran cantidad de procedimientos que intervienen, como lo son los medios de distribución entre una entidad y otro.

Al estar tan relacionadas una entidad y otra, esto dispone una gran correlación frente al funcionamiento de cada uno de ellos, si un actor de la cadena falla, esto se verá reflejado directamente en los otros. En ese sentido, “Una cadena de suministros se basa en la cooperación entre los agentes que la conforman”.³

6.1.2 Etapas de una cadena de suministros

Las cadenas de suministros, al tener un flujo dinámico y constante de información, requieren de las etapas que se enuncian a continuación.

³ MARTÍN-ANDINO, Ramón. Cadena de Suministro (SCM). Madrid: EOI Escuela de Negocios, 2006. p. 5.

6.1.2.1 Abastecimiento o suministro

Esta etapa responde a las siguientes preguntas: ¿cómo?, ¿cuándo?, ¿cuánto vale?, ¿dónde es posible obtener las materias primas utilizadas para la fabricación del producto final?

6.1.2.2 Fabricación

En esta etapa, las materias primas obtenidas en la etapa anterior son procesadas y tratadas con el fin de generar un producto final u objetivo; el cual, a partir de este momento, continuará con el flujo normal de una cadena, pasando a su etapa de abastecimiento.

6.1.2.3 Distribución

En el momento en que los productos se encuentran terminados, dentro de la cadena de suministros, se inicia el proceso de distribución para que el producto llegue a las manos de los consumidores a través de una red en la que interactúan almacenes, CEDIS, mayoristas o minoristas.

6.1.2.4 Consumidor

Es la persona, la institución u organización que hará uso de los bienes o productos dentro de una cadena de producción.

6.1.3 Flujos de una cadena de suministros

Una cadena de suministros se basa en la gestión que se les dan a los suministros, lo que consiste en el flujo de los materiales y la información. Por esta razón, se divide en dos tipos de flujo.

- Flujos materiales: desde el proveedor al cliente.
- Flujo de información: este funciona al contrario de un flujo material, la información viaja del cliente al proveedor y está definida como órdenes de compra, datos de productos, etc.

6.1.4 Efecto látigo

Consiste en un fenómeno que se presenta con gran frecuencia en las operaciones logísticas; en las cuales, la demanda planteada o esperada en un principio no es la misma que se refleja a medida que se avanza en el tiempo, lo que produce que se tomen diferentes estrategias al flujo del mercado. Esto debido a que ninguno de los planes planeados es suficiente para satisfacer la demanda generada.

Tabla 1. *Casos industriales documentados de efecto látigo*

Año	Industria
1919	Procter & Gamble
1923	Federal Trade Comisión

1958	General Electric
1993	Motorola
1994	Barilla
1997	Procter & Gamble, HP, Bristol-Myers, Squibb y Campbell
2001	Cisco
2005	Philips, Sebastián de la Fuente
2007	Tesco

Fuente: elaboración propia

Se ha evidenciado que el efecto látigo se da más a menudo cuando los miembros de una organización están más preocupados por optimizar los intereses de su compañía, sin contemplar los de los demás actores de la cadena.

6.1.5 Cross Docking

Dentro de las cadenas de suministros, existen diferentes metodologías que se centran en optimizar o mejorar una determinada área de ella; por ejemplo, los tiempos de fabricación y de entrega de un producto, los costos de distribución, los de distribución o la cantidad de productos en *stock*.

Entre las formas de solucionar dichos elementos, el CD se considera una de las mejores prácticas en la actualidad bajo la práctica de velocidad de procesos. En ese orden de ideas, cabe preguntarse ¿Qué es CD? Esta es una metodología en la cual la mercancía es recibida en un almacén o CEDIS, pero no es almacenada, sino que es procesada y enviada inmediatamente. En otras palabras, es lo que se define como la transferencia de un producto a otro con tiempos de almacenaje limitado o inexistentes. Cabe mencionar que existen dos tipos de CD.

- Directo

El producto es preseleccionado por el proveedor conforme a una serie de criterios previamente definidos; se reciben y se transportan a la salida para ser consolidados con los productos similares, sin que sean manipulados.

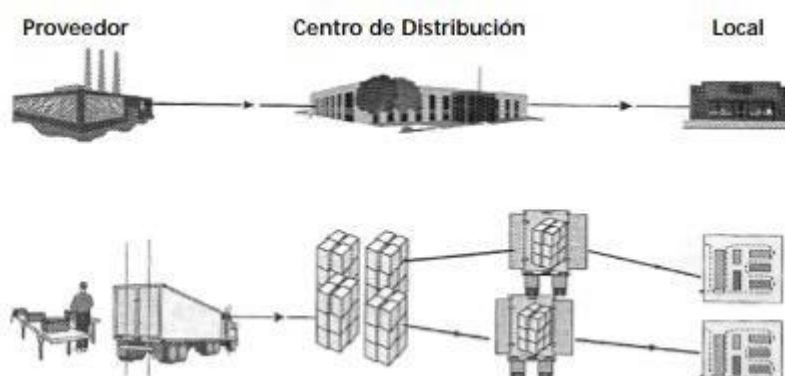


Figura 4. Cómo utilizar los estándares EAN.UCC

Fuente: (BROWN, QUIROGA y GALLÓN, 2013)

- Indirecto

Los productos “son recibidos, separados y etiquetados por el centro de distribución dentro de nuevos *packages* [cajas, estivas, etc.], para ser entregados a locales [...]. Estos nuevos *packages* se transportan”⁴ a la salida y se consolidan con productos similares para ser enviados en los vehículos de entrega locales.

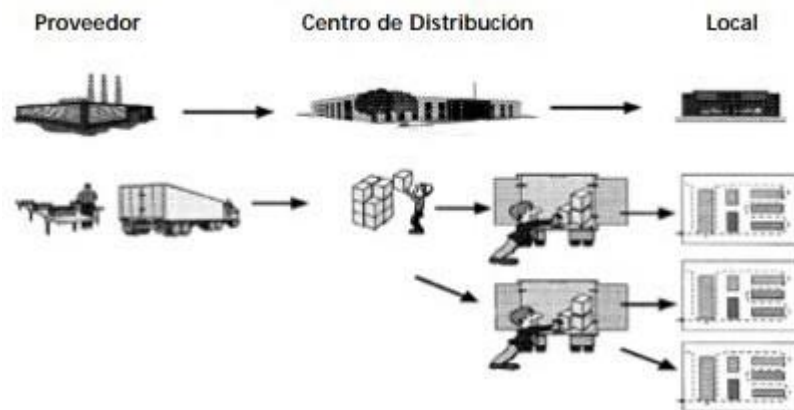


Figura 5. Los estándares de los usuarios EAN.UCC

Fuente: (BROWN, QUIROGA y GALLÓN, 2013)

6.1.6 Programación lineal

La programación lineal es una de las formas más simples para realizar cualquier tipo de optimización, pues ayuda a resolver problemas complejos en los que se busca solucionar y optimizar determinado criterio. En esta técnica, se representan situaciones complejas mediante funciones lineales, para luego encontrar los puntos óptimos del sistema. Los algoritmos de optimización se pueden definir en dos categorías: algoritmos exactos y heurísticos.

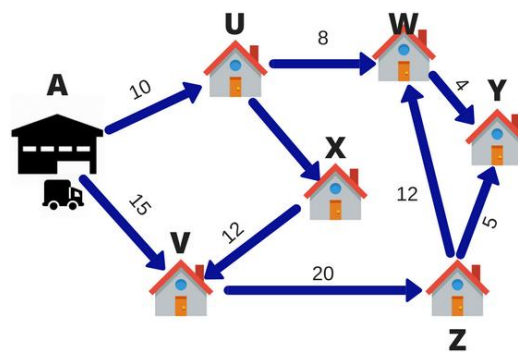


Figura 6. Optimización programación lineal

Fuente: (ANALYTICS VIDHYA, 2017)

⁴ BROWN, Ingrid Viviana; QUIROGA, Juan Pablo y GALLÓN, Fabián Andrés. Proyecto de trabajo de grado para el diseño de la red de valor para pescado fresco hacia las tiendas de CENCOSUD, Colombia en Cundinamarca. Trabajo de grado Especialista en Gerencia Logística en Redes de Negocios. Bogotá, D.C.; Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Administración de Empresas. Especialización en Gerencia Logística en Redes de Negocio, 2013. p. 33.

6.1.7 Heurísticas

La heurística en computación es una forma en la cual se busca priorizar determinadas rutas de cálculos sobre alguna otra, mientras se busca la solución de un determinado problema.

La situación radica en cómo elegir cuál ruta es la más viable con respecto a otras opciones. Así mismo, el algoritmo utilizado debe elegir qué estado buscar cada vez que el camino sea óptimo. Para ello, se usan las heurísticas; es decir, que se eligen los estados con base en alguna suposición, teniendo en cuenta un entrenamiento que se da previamente, bajo algún criterio que puede ser correcto, pero que generalmente aumenta la probabilidad de que se tome una decisión acertada mientras se busca un estado final adecuado. Lo anterior con el fin de llegar a un espacio de solución posible, enfocándose en soluciones aproximadas que cumplan los criterios de éxito del sistema.

6.1.8 Metaheurísticas

Las heurísticas dependen de los problemas y se adaptan a ellos, pero las metaheurísticas son independientes del problema. Como tales, no aprovechan ninguna particularidad de la problemática y pueden utilizarse como cajas negras.

De hecho, incluso, son capaces de aceptar un deterioro temporal de la solución, lo que les permite explorar más a fondo el espacio de la solución y, por lo tanto, obtener una mejor solución óptima y global del problema. Se debe tener en cuenta que, aunque una metaheurística es una técnica independiente del problema, es necesario realizar un ajuste fino de sus parámetros para adaptar la técnica al problema en cuestión.

6.1.9 Algoritmos genéticos

Los Algoritmos Genéticos (GA, por su nombre en inglés) son una técnica de optimización basada en la búsqueda de soluciones mediante los principios de selección natural. Así como las heurísticas, se usa para encontrar soluciones óptimas o casi óptimas de acuerdo con un determinado problema.

Estos hacen parte de una rama de la computación denominada computación evolutiva, mediante un GA se somete un conjunto de soluciones óptimas a una serie de combinaciones y mutaciones, como se presenta en la genética humana, buscando que el algoritmo dentro de un grupo de restricciones evolucione normalmente, mientras busca que su rendimiento mejore en este ambiente controlado.

En este sentido, “Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio supervivencia del más apto”;

⁵ Así, “los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para

⁵ GESTAL, Marcos. (s.f.). Introducción a los algoritmos genéticos [en línea]. 2018 [citado]. Disponible en internet:

problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas”.⁶ Cabe añadir:

[Que] los Algoritmos Genéticos usan una analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. En la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma.

[...] El poder de los Algoritmos Genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria.⁷

6.1.10 Ramificación

En cuanto a la ramificación, se debe mencionar que es:

Un método usado para resolver un problema de programación entera en el que los nodos del árbol asociado se examinan de una manera sistemática tratando de eliminar por consideración tantos nodos terminales como sea posible.

Con el método de ramificación y acotamiento, en vez de buscar los nodos terminales directamente, comienza en el nivel superior del árbol y procede de nodo en nodo hacia la base del árbol y los nodos terminales. En cada nodo, se resuelve el programa lineal asociado. Sobre la base de esta solución, se toma una decisión respecto a que nodos del árbol, si los hay, pueden eliminarse para otras consideraciones, lo que reduce el número de nodos terminales que necesitan examinarse.⁸

https://www.researchgate.net/publication/237812449_Introduccion_a_los_Algoritmos_Genetico s. p. 2.

⁶ BALCUCHO, José Alfredo y GUALDRÓN, Oscar Eduardo. Optimización de la base de reglas de un controlador difuso, mediante técnicas estocásticas como algoritmos genéticos y el simulated annealing. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada [en línea]. 2010, vol.2, no.16 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_16/27102011/10.pdf. p. 67.

⁷ MOUJAHID, Abdelmalik; INAZA, Iñaki y LARRAÑAGA, Pedro. (s.f.). Tema 2. Algoritmos genéticos [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/t2geneticos.pdf>. pp. 1-2.

⁸ GUANGA, Alexander; MALAN, Mónica y ZUMBA, Jessica. Aplicación del método de ramificación y acotamiento en la empresa "Muebles Dormihogar" [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://es.slideshare.net/jessicazumba7/final-operativa>. p. 5.

6.1.10.1 Características

- Si un problema de programación lineal en un nodo es infactible, entonces también lo es el problema entero asociado en ese nodo, así como todos los problemas asociados con los nodos debajo del actual.
- Si el programa lineal actual tiene una solución óptima, entonces el valor óptimo de la función objetivo del problema entero correspondiente, así como de cualquier programa lineal o entero asociado con un nodo debajo del actual, no puede exceder el del actual.
- Mientras más lejos se fije el valor de una variable de su valor en la solución óptima de un programa lineal, peor será el valor de la función objetivo óptima del programa lineal asociado.
- Una vez que un problema de programación lineal es infactible para un valor entero fijo de una variable mayor (menor) que su valor óptimo en el programa lineal, todos los valores mayores (menores) de esta variable originan problemas de programación lineal infactibles.
- Si el programa lineal en un nodo es ilimitado, el problema de programación entera es ilimitado o infactible.⁹

Por otro lado:

La técnica de Ramificación [...] se suele interpretar como un árbol de soluciones, donde cada rama nos lleva a una posible solución posterior a la actual; es que el algoritmo se encarga de detectar en qué ramificación las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para podar esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima.¹⁰

6.1.10.2 Estrategias de ramificación

Ahora, las estrategias de ramificación refieren a lo siguiente:

La expansión del árbol con las distintas estrategias está condicionada por la búsqueda de la solución óptima. Debido a esto todos los nodos de un nivel deben ser expandidos antes de alcanzar un nuevo nivel, cosa que es lógica ya que para poder elegir la rama del árbol que va a ser explorada, se deben conocer todas las ramas posibles.¹¹

6.1.10.3 Estrategia FIFO

Por la misma línea, “La LNV [Lista de Nodos Vivos] será una cola, dando lugar a un recorrido en anchura del árbol”.¹²

⁹ Ibid. p. 5.

¹⁰ WIKIPEDIA. (s.f.). Ramificación y poda [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: https://es.wikipedia.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n_y_poda. párr. 2.

¹¹ VÁZQUEZ, Jair. (s.f.). Ingeniería en computación [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70265/secme-32643_1.pdf;jsessionid=1F0049E6E764B360280FE7DEF53F654?sequence=1. p. 84.

¹² LINKPANG. Ramificación y poda [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en internet: https://es.linkfang.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n_y_acotaci%C3%B3n. párr. 23.

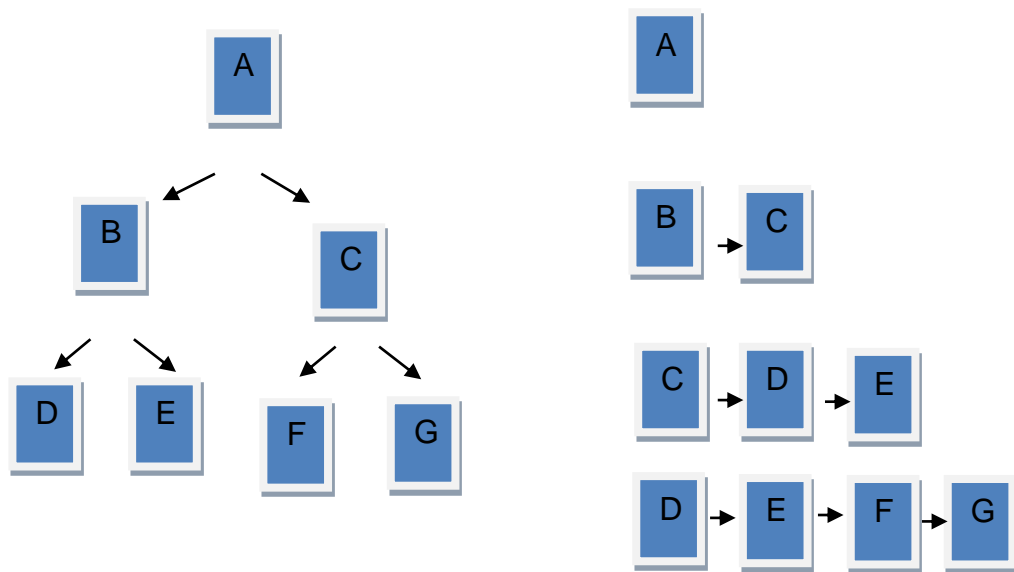


Figura 7. Desarrollo de un árbol mediante una estrategia FIFO

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia:

En la Figura [7] se puede observar que se comienza introduciendo en la LNV el nodo A. Sacamos el nodo de la cola y se expande generando los nodos B y C que son introducidos en la LNV. Seguidamente se saca el primer nodo que es el B y se vuelve a expandir generando los nodos D y E que se introducen en la LNV. Este proceso se repite mientras que quede algún elemento en la cola.¹³

6.1.10.4 Estrategia LIFO

Por su parte, “La LNV [es] una pila, produciendo un recorrido en profundidad del árbol”.¹⁴

¹³ Ibid. párr. 24.

¹⁴ Ibid. párr. 25.

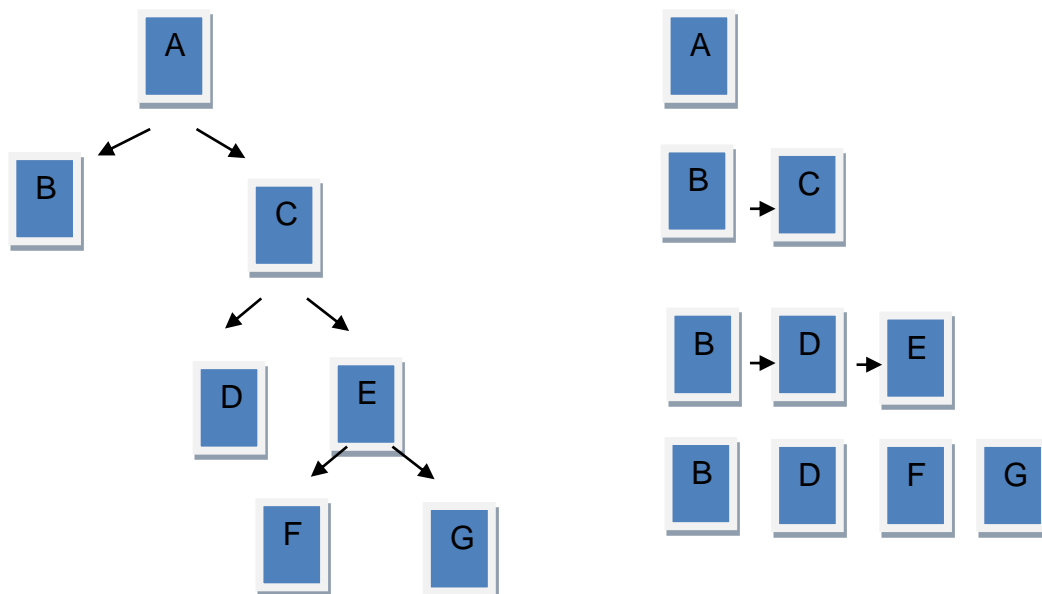


Figura 8. Desarrollo de un árbol mediante una estrategia LIFO

Fuente: elaboración propia

Así:

En la Figura [8] se muestra el orden de generación de los nodos con una estrategia LIFO. El proceso que se sigue en la LNV es similar al de la estrategia FIFO, pero en lugar de utilizar una cola, se utiliza una pila.¹⁵

6.1.10.5 Estrategia de menos coste o LC

Por otro lado, cabe decir sobre las estrategias de menos corte:

Al utilizar las estrategias FIFO y LIFO se realiza lo que se denomina una búsqueda “a ciegas”, ya que expanden sin tener en cuenta los beneficios que se pueden alcanzar desde cada nodo. Si la expansión se realizase en función de los beneficios que cada nodo reporta, es decir una visión de futuro, se podría conseguir en la mayoría de los casos una mejora sustancial.

Es así como nace la estrategia de Menor Coste o LC, selecciona para expandir entre todos los nodos de la LNV aquel que tenga mayor beneficio o menor coste. Por tanto, ya no se habla de un avance a ciegas.

Estrategia LC-FIFO: Elige de la LNV el nodo que tenga mayor beneficio y en caso de empate se escoge el primero que se introdujo.

Estrategia LC-LIFO: Elige de la LNV el nodo que tenga mayor beneficio y en caso de empate se escoge el último que se introdujo.¹⁶

6.2 MARCO TEÓRICO

¹⁵ Ibid. párr. 26.

¹⁶ Ibid. párr. 27-31.

6.2.1 Supermercado Walmart

Esta multinacional de tiendas de origen estadounidense opera cadenas de suministros eficientes.

[Puesto] que fue una de las primeras entidades multinacionales en la que se enfocó en la optimización de la cadena de suministros. Walmart utiliza un sistema innovador llamado *Cross Docking* mediante esta técnica se transfieren los productos directamente al camión que los ha de repartir sin tener que pasar por el almacén, y por lo tanto, ahorrando todos los costes de almacenamiento.

[...] Otra de las tecnologías innovadoras que usa Walmart es el uso de etiquetas de identificación de radiofrecuencia, mediante las cuales y gracias a un código numérico se rastrea cualquier mercancía esté donde esté, ya sea de camino a una entrega, o en un camión de un proveedor. Esto permite tener controlado todo el stock y las mercancías, solucionando cualquier problema que pueda surgir en las mismas y evitando tener costes por retrasos o pérdidas.

[...] Gracias al ahorro de estos costes Walmart puede ofrecer productos a un precio muy inferior al de sus competidores.¹⁷

De acuerdo con su metodología, ha traído una gran influencia positiva en su cadena de suministro, lo que le da una oportunidad de crecimiento exponencial a nivel mundial.

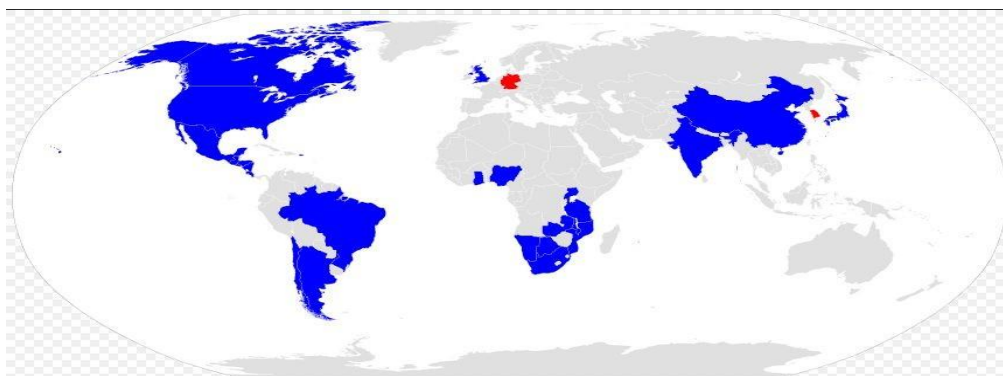


Figura 9. Territorio apropiado por Walmart

Fuente: (UN GEÓGRAFO SIN GEOGRAFÍA, 2014)

6.2.2 Almacenes Éxito

Esta empresa multinacional colombiana ofrece un servicio nacional, a la par que realiza actividades de comercio textil, comidas perecederas, electrodomésticos, entre otros.

Los servicios que prestan son de metodología CD y tienen una red logística a nivel nacional, en las diferentes ciudades, como Barranquilla, Medellín, Bogotá, Cali y Bucaramanga.

¹⁷ ARKANET. Logística [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://www.arkanet.mx/administrador/logistica.html>. párr. 4.

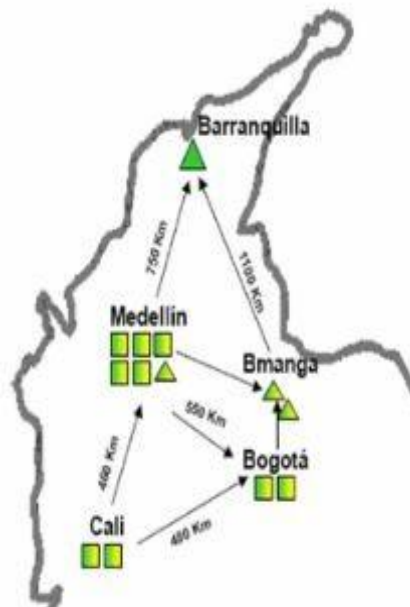


Figura 10. Red logística a nivel nacional Éxito

Fuente: (ANONYMOUS, 2014)

Cabe añadir:

[Que] es una de las primeras empresas colombianas en implementar el *Cross Docking* fue almacenes Éxito S.A. Inició el proceso a finales de los años 90 y a partir del año 2001 logró implementar esta práctica por completo, a la par con sus diferentes proveedores.¹⁸

Esta implementación que utiliza almacenes Éxito:

[...] permite reducir de manera importante o totalmente en algunos casos los inventarios, además de esto se agiliza la cadena de abastecimiento. [...] almacenes Éxito ha ido construyendo una red logística que tiene como elemento fundamental el sitio y el tiempo en que los artículos se entregan. Para cada uno de los almacenes, en cada ciudad y por cada tipo de mercancía, [...] esta red logística de distribución de almacenes Éxito, es un esquema creado por la compañía con el fin de incrementar la eficiencia y optimizar los costos a lo largo de la cadena de abastecimiento.¹⁹

Esta implementación llega a satisfacer necesidades del cliente y ventajas de esta red logística, como la consolidación de entregas en un solo sitio por ciudad. Esto elimina facturaciones independientes y entregas fragmentadas; también en conservar productos perecederos en cadenas de frío y congelados, simplificar las operaciones logísticas para los proveedores y al brindar la oportunidad de

¹⁸ ANONYMOUS. Logística almacenes Éxito [en línea]. 2014 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://almacenesexitologistica.blogspot.com/2014/05/logistica-almacenes-exito.html>. párr. 2.

¹⁹ Ibid. párr. 13-19.

acceder a mercados en todo el territorio nacional.²⁰

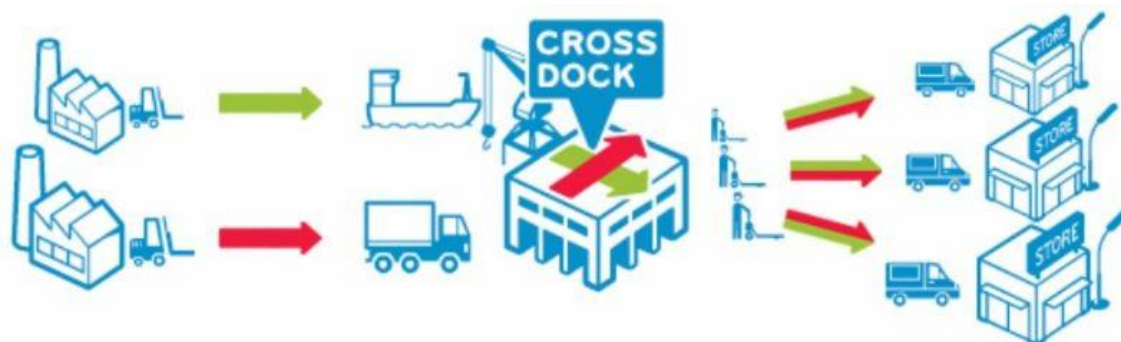


Figura 11. Logística de almacenamiento Éxito de Cross Docking

Fuente: (ANONYMOUS, 2014)

6.2.3 Bimbo

Bimbo es reconocida como una de las más prestigiosas empresas panificadoras del mundo por su alto grado de calidad en sus productos. En este sentido:

Bimbo logró un envidiable posicionamiento en unos pocos meses, con un concepto que en Colombia era revolucionario: pan empacado que está fresco en el momento de consumirlo [...]. Según cifras de AC Nielsen, en el centro del país Bimbo conquistó ya cerca del 50 % del consumo en supermercados, y su proceso de expansión [mejora cada día].²¹

Este es un punto de intriga del problema en el que el consumidor, de acuerdo con las operaciones y los procesos, obtiene un producto en las condiciones que lo desea, dónde y cuándo lo necesita y a un precio que está dispuesto a pagar. Hoy en día, se hace “referencia a modernos sistemas de información, comunicación en tiempo real, manejo de inventarios entrelazados entre proveedores, técnicas estadísticas y plataformas de *Cross Docking* que traen ahorros en eficiencia para la empresa”.²²

La logística es una competitividad ruda de atender que, gracias a metodologías existentes, puede maximizar bienes y minimizar costos totales como lo ha hecho Bimbo; quien, por medio de metodologías de plataformas de CD, ha podido satisfacer los consumidores al dar ventajas en su producto al utilizar este tipo de estrategias para el crecimiento nacional. Sin embargo, esta cadena de suministro conlleva a la creación de un modelo de distribución complicada para el objetivo de esta empresa panificadora; quien utiliza CD para las reexpediciones de productos perecederos, pero llevando un éxito total nacional a esta entidad.

²⁰ RODRÍGUEZ, Edgar Guillermo. Identificación de prácticas en la gestión de la cadena de suministro sostenible para la industria alimenticia. Revista Científica Pensamiento y Gestión [en línea]. 2018, no.45 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://dx.doi.org/10.14482/pege.41.9704>.

²¹ MARKETING. La última frontera [en línea]. 2020 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: bit.ly/39DgObt. párr. 2.

²² Ibid. párr. 4.

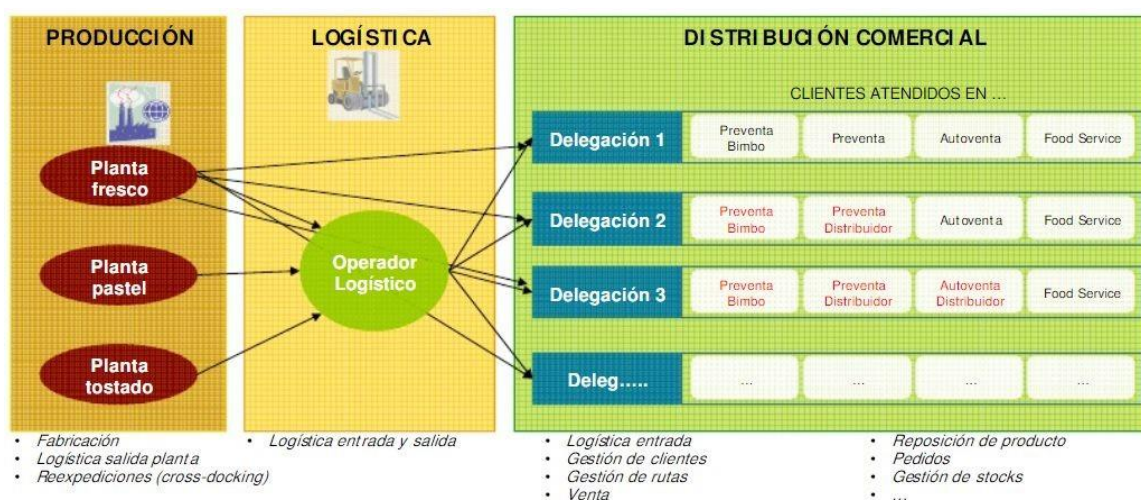


Figura 12. Modelo de distribución Bimbo

Fuente: (MARKETING, 2020)

6.2.4 Empresa Tecnoquímicas (TQ)

Este es un grupo empresarial colombiano reconocido en la industria de farmacéuticos y de consumo masivo que ha tenido un crecimiento económico y un avance social exitoso. La empresa se distingue por sus “aportes a la investigación y el desarrollo de productos innovadores para la salud y el bienestar de las personas en Colombia y varios países de América en los que están presentes”.²³

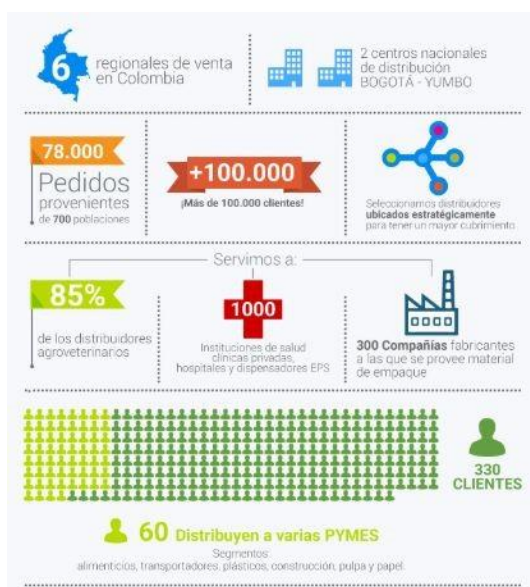


Figura 13. Avance Nacional TQ

Fuente: (TQ CONFIABLE, s.f.)

²³ TQ CONFIABLE. (s.f.). Nosotros [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://www.tqconfiable.com/quienes-somos-home>. párr. 2.

Cabe mencionar:

[Que] Tecnoquímica cuenta con dos centros nacionales de distribución ubicados en Yumbo y Bogotá desde donde se atienden aprox. 78 000 pedidos de clientes al mes provenientes de 700 poblaciones de Colombia.

Para una mayor optimización Tecnoquímicas trata respecto al área de tráfico y transporte con 27 plataformas *Cross Docking* ubicadas en 15 ciudades principales, de acuerdo a la estrategia mencionada han podido crecer respecto a los buenos cumplimientos al consumidor, y suplir sus necesidades. Gracias a esta estrategia, sus procesos de cadena de suministros han podido desentenderse a procesos de almacenaje como: recibo de productos, almacenamiento, separación y despacho y gestión de logística inversa, es decir, control de mercancía no recibida y devoluciones; y a procesos de tráfico y transporte como: negociación y contratación (transporte masivo y paqueteras).²⁴



Figura 14. Distribución Nacional TQ

Fuente: (TQ CONFIABLE, s.f.)

²⁴ TQ CONFIABLE. (s.f.). TQ en Colombia [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://www.tqconfiable.com/crossdocking>. párr. 1-2.

7 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

7.1 ESTADO DEL ARTE

De acuerdo con el proceso de revisión sistemática en diferentes investigaciones, publicaciones y revistas académicas, entre el 2014 y el 2020 se identificaron modelos y algoritmos metodológicos en desarrollos teóricos y prácticos con algoritmos de localización para la eficiencia entre distancias. Algunos de estos análisis se abordan continuación.

El problema de tamaño de flota y mezcla de enrutamiento de ubicación con ventanas de tiempo: formulaciones y algoritmo heurístico.

Este documento presenta el problema del tamaño de la flota y la combinación de enrutamiento de ubicación con ventanas de tiempo (FSMLR PTW) que amplía el problema de enrutamiento de ubicación al considerar una flota heterogénea y ventanas de tiempo.

El objetivo principal es minimizar la suma del costo fijo del vehículo, el costo de depósito y el costo de ruta. Para el desarrollo de este objetivo principal, se presenta la formulación de programación y el desarrollo de un algoritmo híbrido de búsqueda evolutiva (HESA), combinando con éxito varias metaheurísticas.

Dicho algoritmo ofrece procedimientos y diseños para manejar decisiones de ubicación y dimensionamiento de flota para encontrar soluciones óptimas. Este algoritmo HESA es evaluado computacionalmente para investigar su desempeño, lo cual se demostró que este algoritmo es altamente efectivo para dar una solución óptima del tamaño de la flota y la combinación de enrutamiento con ventanas de tiempo.

Para dar claridad sobre los problemas principales de la distribución, es fundamental saber los requerimientos principales para el diseño de cadenas de suministros, que es la determinación de las ubicaciones de los depósitos o instalaciones (FLP) y el diseño de rutas de vehículos que suministran los clientes. La idea principal es combinar las decisiones de ubicación y enrutamiento que se presentaron hace más de cincuenta años²⁵ y han dado lugar a una rica investigación conocida como Locación de Problema de Enrutamiento (LRP). Estas combinaciones surgen en las áreas de distribución de alimentos perecederos y bebidas, en la entrega de paquetes y el diseño de redes.

En el FSMLR PTW, se considera una flota de vehículos con diversas capacidades y costos relacionados con los vehículos, así como un conjunto de depósitos potenciales con costos y capacidades de apertura, y un grupo de clientes con demandas conocidas y ventanas de tiempo. El FSMLR PTW consta de abrir un subconjunto de depósitos, asignarles clientes y determinar un conjunto de rutas para vehículos heterogéneos, de modo que todos los vehículos comiencen y terminen sus rutas en su depósito; cada cliente es visitado

²⁵ HANIK, Dean M. Industrial location theory. International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology [en línea]. 2017, vol.15 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0216>.

exactamente una vez por un vehículo dentro de un período de tiempo predeterminado, y la carga de cada vehículo no excede su capacidad.²⁶

El objetivo es minimizar el costo total que se compone de tres componentes: el costo operativo de depósito, el costo fijo de los vehículos y los costos totales de viaje de los vehículos. Se supone que estos costos se escalan en el mismo horizonte temporal. Las contribuciones de este documento son las siguientes:

- Se desarrolla un algoritmo híbrido de búsqueda evolutiva (HESA) con la introducción de varios procedimientos algorítmicos específicos para el FSMLR PTW.
- La introducción de los procedimientos de búsqueda adaptivos para la ubicación heterogénea.
- Se propone un procedimiento de inicialización para soluciones iniciales y un procedimiento de partición para las soluciones descendientes.
- Finalmente, desarrolla un nuevo esquema de diversificación a través del procedimiento de mutación de soluciones.

La función objetivo

El modelo propuesto define la función objetivo en minimizar el costo total, incluyendo el costo fijo de depósito, el del vehículo y el de viaje variable.

Modelo Función Objetivo

$$(E_1) \text{Minimize } \sum_{k \in N_0} g^k y_k + \sum_{h \in K} \sum_{k \in N_0} \sum_{i \in N_c} f^h x_{ki}^h + \sum_{h \in K} \sum_{(ij) \in A} c_{ij} x_{ij}^h$$

Ecuación 1

El algoritmo híbrido para la búsqueda evolutiva híbrida llamado HESA propuesto para resolver FSMLR PTW.

Algoritmo HESA - Marco general de HESA

- 1: **INICIALIZACIÓN**: inicializar una población con tamaño n_p
- 2: **WHILE** numero de iteraciones sin aumento $< \varpi$ **do**
- 3: *Principal selección*: selecciona la solución principal P_1 y P_2
- 4: *Crossover*: generar descendencia C de P_1 y P_2
- 5: *PARTITION*: particionar la descendencia C en rutas
- 6: *EDUCATION*: Educar C con L-HALNS e insertar en la población 7:
 AWAP: actualizar probabilidades de la L-HALNS operador

²⁶ CHANG, Keliang, et al. Multiobjective location routing problem considering uncertain data after disasters. Discrete Dynamics in Nature and Society [en línea]. 2017, [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1155/2017/1703608>.

- 8: *INTENSIFICACIÓN*: intensifica la solución de élite con L-HANS
- 9: *Selección sobreviviente*: si la población de tamaño n_a alcanza $n_p + n_0$ luego seleccione sobreviviente
- 10: *MUTACIÓN*: diversificar una solución al azar con probabilidad p_m
- 11: **end while**
- 12: Retorna la mejor solución factible

El problema FSMLR PTW es un problema logístico complejo y se ha descrito un algoritmo híbrido evolutivo adaptado al problema, donde se introdujo varios procedimientos al FSMLR PTW.

- Procedimiento de búsqueda adaptivo heterogéneo de ubicación.
- Procedimiento de inicialización para soluciones iniciales.
- Procedimiento partición para soluciones descendientes.
- Procedimiento de mutación de soluciones.

En la conclusión del artículo, se expresan y presentaron resultados computacionales en un nuevo conjunto de instancias de referencia de hasta 100 nodos y 10 depósitos potenciales, lo que indica que el algoritmo propuesto puede identificar soluciones dentro del 0.05 % de la optimización para instancias de pequeño tamaño y proporciona mejores soluciones para instancias más grandes, en comparación con un solucionador estándar. Los tiempos de ejecución del algoritmo son para que pueda usarse en aplicaciones prácticas.

Problema de enrutamiento de ubicación de vehículos múltiples de dos niveles con ventanas de tiempo para la optimización de la red de cadena de suministro sostenible de comida perecedera.

Las crecientes preocupaciones de una nueva visión del impacto de las operaciones de la cadena de suministro en el medio ambiente y la sociedad al diseñar una cadena de suministro sostenible donde se desafía la industria, con el objetivo de distribuir alimentos perecederos de alta calidad en toda la cadena de suministro de alimentos, conlleva a buscar proposiciones de soluciones. Este artículo propone un modelo de optimización multiobjetivo integrando la sostenibilidad en la toma de decisiones, en la distribución en una red de cadena de suministro de alimentos perecederos (SCN).

El artículo presenta abordar la solución del problema de enrutamiento de ubicación de dos niveles con ventanas de tiempo (2E-LRPTW) para un diseño SCN sostenible y la optimización de objetivos económicos y ambientales en un SCN de alimentos perecederos. El objetivo de 2E-LRPTW es determinar el número y las instalaciones de ubicación y optimizar la cantidad de productos entregados a etapas y rutas inferiores en cada nivel. El método propuesto incluye un nuevo enfoque híbrido multiobjetivo llamado MHPV, un híbrido de dos algoritmos conocidos de objetivos múltiples:

- Optimización de enjambre de partículas multiobjetivo (MOPSO).
- Búsqueda de vecindad variable multiobjetivo adaptada (AMOVNS).

Los consumidores de hoy en día consideran criterios como calidad, seguridad y conformidad ambiental para tomar decisiones de compra; a menudo, están dispuestos a pagar más por productos sostenibles. Los gerentes de las industrias alimentarias deben reaccionar a estas demandas cambiantes de los consumidores, aumentando la sostenibilidad de sus procesos y productos.²⁷

La gestión de las cadenas de suministro de alimentos (FSC) es un problema importante debido a la escala de esta industria, la cantidad de desperdicio global de alimentos y la relación entre el desperdicio de alimentos y la desnutrición global.

Los problemas de enrutamiento y ubicación fueron una de las principales preocupaciones en logística, que tiene implicaciones en la cadena de suministro completa. El problema de enrutamiento de ubicación (LRP) es relativamente nuevo que considera dos componentes clave de un sistema logístico: el problema de ubicación de las instalaciones (FLP) y el problema de enrutamientos de vehículos (VRP).

Un LRP se define como un caso especial de VRP, donde existe la necesidad de determinar el número óptimo y la ubicación de los depósitos simultáneamente con la búsqueda de rutas de vehículos, desde los depósitos, hasta los clientes para minimizar los costos asociados con la ubicación de depósitos y distribución clientes.²⁸

La función objetivo

A continuación, se observa la función objetivo propuesta para minimizar los costos totales variables y fijos del SCN.

Modelo propuesta para minimizar los costos totales variables y fijos del SCN.

²⁷ WOGNUM, P. M., et al. Systems for sustainability and transparency of food supply chains - Current status and challenges. Advanced Engineering Informatics [en línea]. 2011, vol.25 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.001>.

²⁸ GARCÍA, Lucero y BAEZA, Roberto. Configuración de la cadena de suministros y la cadena de valor para una phyme. Verano de la investigación Científica [en línea]. 2017, vol.3, no.2 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2045/1539>.

$$\begin{aligned}
\text{Min OBJ1} = & \sum_{m \in M} OC_m \sum_{e \in Tech} Z_{me} + \sum_{m \in M_e} \sum_{e \in Tech} SC_{me} Z_{me} + \sum_{d \in D} OC_d Y_d \\
& + \sum_{p \in P} \left(\sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} \sum_{ij \in N_1} C_{ij} X_{ijp}^{m_k k} + \sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} \sum_{ij \in N_1} C_{ij} X_{ijp}^{m_k k} \right. \\
& + \sum_{m \in M_e} \sum_{e \in Tech} VC_{mep} h_{mep} + \sum_{d \in D} VC_{dp} \left(\sum_{l \in L} \beta_{dlp} \left(\sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} n_{lp}^{m_k k} \right) \right) \\
& + \sum_{m \in M_d} \sum_{d \in DK} \sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} FV F_k X_{mdp}^{m_k k} + \sum_{d \in M_d} \sum_{d \in DK} \sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} FV S_k r_{dlp}^{m_k k} \\
& + \sum_{d \in D} P d_{dp} (u d_{dp}) + \sum_{l \in L} P r_{lp} (u r_{lp}) + \sum_{d \in D} H C_{dp} l_{dp} + \sum_{l \in L} H C_{lp} l_{lp}
\end{aligned}$$

Ecuación 2

Se puede observar en la función objetivo de medir el impacto ambiental total en toda la red.

Modelo función objetivo medición del impacto ambiental total de toda la red.

$$\begin{aligned}
\text{Min OBJ2} = & + \sum_{m \in M_e} \sum_{e \in Tech} EO_{me} Z_{me} + \sum_{d \in D} EO_d Y_d \\
& + \sum_{p \in P} \left(\sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} \sum_{ij \in N_1} ET_{ij} X_{ijp}^{m_k k} + \sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} \sum_{ij \in N_2} ET_{ij} r_{ijp}^{m_k k} \right. \\
& + \sum_{d \in D} VE_{dp} \left(\sum_{l \in L} \beta_{dlp} \left(\sum_{k \in K} \sum_{m_k \in M_k} n_{lp}^{m_k k} \right) \right) + \sum_{m \in M_e} \sum_{e \in Tech} VE_{mep} h_{mep}
\end{aligned}$$

Ecuación 3

Propuesta metaheurística híbrida

La optimización de objetivos múltiples representa una clase importante de técnicas de optimización que tienen una implicación directa para resolver muchos problemas del mundo real. La propuesta de un algoritmo metaheurístico multiobjetivo híbrido llamado MHPV que combina la optimización de multitud de partículas multiobjetivo adaptado (MOPSO) y la búsqueda de vecindario variable multiobjetivo adaptada algoritmo (AMOVNS).

A. Algoritmo metaheurístico MHPV - MOPSO

La optimización de enjambre de partículas (PSO) se ha introducido como técnica de búsqueda. Esta técnica es un método de optimización aleatorio, basado en la población e inspirado por el comportamiento social de la cría de aves o la escolarización de peces y sus medios de intercambio de información.²⁹ PSO ha

²⁹ KOÇ, Çağrı, et al. The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulation and a heuristic algorithm. European Journal of Operational Research [en línea].

sido utilizado con éxito en varios mundos reales aplicaciones

En PSO, se forma aleatoriamente un grupo de partículas; cada partícula representa una posible solución para un problema de optimización y busca la óptima actualizando generaciones. Cada solución individual o potencial, denominada partícula, contiene una decisión variable.

Algoritmo

MOPSO

Inicialización

Establecer los parámetros Max It, nPop, nRep, $\omega, \phi_1, \phi_2, r_1, r_2$ and nGrid;

Seleccionar las 2 estrategias S_1 o S_2 para determinar el líder

Inicializar partículas (definir posición (x) y velocidad(v) para cada partícula);

Inicializar archivo $\hat{A}_{iter} = \{\}$

Evaluar las partículas y calcular la cuadrícula según nGrid si S es seleccionado, y de otra manera CD;

Asume la mejor individual (iep_{gh}) igual para inicializar partículas

Seleccionar leader (iep_{gh}) como la mejor partícula basada en seleccionar una estrategia.

For iter = 1 to MaxIt

Update p_m ;

Select leader (i.e. p_{gh}) based on Grids if S 1 selected, otherwise based on CD;

$$\vec{v}_{m+1} = \omega \vec{v}_m + \phi_1 r_1 x(p_m - \vec{x}_m) + \phi_2 r_2 x(p_m - \vec{x}_m) \vec{v}_{m-1}$$

$$\vec{x}_{m+1} = \vec{x}_m + \vec{v}_{m+1}$$

If $\vec{x}_{min} > \vec{x}_{m+1}$ **or** $\vec{x}_{m+1} > \vec{x}_{max}$

$$\vec{x}_{m+1} = \vec{x}_m + \vec{v}_{m+1} - (\vec{x}_{min} - (\vec{x}_m + \vec{v}_{m+1})) \text{ or}$$

$$\vec{x}_{m+1} = \vec{x}_m + \vec{v}_{m+1} - (\vec{x}_m + \vec{v}_{m+1}) - \vec{x}_{max}, \text{ respectively;}$$

End

Evaluate the particles and calculate the grids according to nGrid (in S1) and CD (in S 2);

Update the archive (\hat{A}_{iter})

$$\hat{A}_{iter} = \{\hat{A}_{iter-1} \cup (Non - Dominated Particles_{iter})\}$$

If the number of $\hat{A}_{iter} > nRep$

Eliminate the surpluses members by considering Grids in S1 and CD in S2

End

End

Report the \hat{A}_{Maxlr}

B. Algoritmo metaheurístico MOPSO combinado (VNS)

El enfoque MOPSO se hibrida con vecindad variable buscar (VNS) como una función de búsqueda local para mejorar el rendimiento del algoritmo.

Algoritmo Metaheurístico MOPSO
combinado (VNS)

Busqueda Local (AMOVNS) procedimiento ()

recibe \hat{P} y \hat{A} // $\hat{P} = \{1, 2, \dots, PopSize\}$, $\hat{A} = \{non - soluciones dominadas\}$ / Inicial

$\hat{P} = []$ // Archivo temporal

for LSitr = 1 **to** Maxlstr **do**

seleccionar estrategia $S_{ls1} \vee S_{ls2}$ basado en *Roulette Wheel Method* ()

if S_{ls1} esseleccionado

Se es elegido al azar entre $(x^{-1}, \dots, x^{PopSize})$

else

S se seleccionado segun el procedimiento() de distancia de apiñamiento

among $x^{-1} \in \hat{A}$

endif

for $N_{ns} = 1$ **to** ns_{max} **do**

determinar una solución aleatoria de N_{ns}

realizar una búsqueda de vecindario N_{ns} para encontrarlo

evaluar soluciones

if estrategia = S_{ls1}

$$P_{LS} = \widehat{P_{LS}} \cup S$$

```

else
    if  $S \subseteq \{s\}$ 
        actualizar  $\hat{A}$  con  $S$  y romper
    elseif  $s \in S$  y ninguno se dominó
        seleccionar  $s$  o  $s'$  al azar y si  $s'$  es seleccionado, actualizar  $\hat{A}$ 
    endif
endif
endfor

A := actualizar conjunto de archivos enviados ( $P_{LS}$ )

```

endfor

En este documento, se aplica un novedoso enfoque de optimización híbrida para diseñar estratégicamente un SSCN multipropósito de alimentos perecederos con el doble objetivo de minimizar los costos y los efectos ambientales, juntos.

En este sentido, para modelar el sistema de distribución se utiliza un problema de enrutamiento de ubicación de vehículos múltiples de dos escalones con ventanas de tiempo. Debido a la complejidad del problema, se propuso un nuevo algoritmo metaheurístico híbrido llamado MHPV, que combina MOPSO y AMOVNS.

En los resultados obtenidos por el algoritmo propuesto, casi dominan los resultados de los algoritmos de referencia. Además, según DM, SNS y POD métricas de rendimiento, MHPV (CD) fue más eficiente que otros enfoques, mientras que basado en MID, mientras que no había aparente discrepancia entre MHPV (CD) y MHPV (Grids); hubo una prioridad diluida para ambos en comparación con otro punto de referencia de métodos.³⁰ Asimismo, el análisis de sensibilidad sobre las dimensiones del problema reveló que MHPV con ambas estrategias (es decir, CD y Grids) produjeron mejores soluciones en comparación con otros.

Generalización de los problemas de ubicación plana restringida.

Algoritmos metaheurísticos unificados

En los problemas de ubicación plana restringida, las instalaciones no se pueden ubicar dentro de ciertas áreas en el plano. Para ello, se definen regiones congestionadas como áreas poligonales en el plano dentro de las cuales no es factible ubicar una instalación, pero a través de las cuales es posible viajar a un costo fijo adicional.³¹ Se muestra que el problema de ubicación con regiones

³⁰ GESTAL. Op. Cit.

³¹ FARHAM, Mohammad Saleh; SRAL, Haldun y IYIGUN, Cem. A column generation approach for the location-routing problem with time windows. Computers and Operations Research [en línea]. 2018, vol.90 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.09.010>.

congestionadas en el plano euclidiano es una generalización de los dos problemas más estudiados en la literatura, es decir, los problemas de ubicación de instalaciones planas restringidas con regiones prohibidas y con barreras.

En este artículo, proponen tres algoritmos metaheurísticos mejorados con un procedimiento de búsqueda local para resolver el problema de ubicación plana restringida.

El problema clásico se busca la ubicación de una sola instalación en el plano para minimizar las distancias totales ponderadas entre la instalación y un conjunto de puntos de demanda. En situaciones de la vida real, pueden existir limitaciones en el sitio de ubicación de la instalación y en las rutas de viaje. Si las instalaciones no se pueden ubicar en una parte del plano, el problema se denomina problema de ubicación de instalaciones planas restringidas (RLocP). En la literatura, los RLocP se clasifican en tres grupos:

- Regiones prohibidas donde viajar es gratis.
- Barreras donde viajar es imposible.
- Regiones congestionadas donde se permite viajar a un costo adicional.

Un ejemplos de regiones que prohíben la ubicación de instalaciones son montañas, lagos, parques nacionales, áreas urbanas y carreteras donde las restricciones sobre las rutas de viaje pueden surgir de preocupaciones legales, sociales o económicas. Se muestra que cuando se imponen restricciones a la instalación y ubicaciones (y rutas de viaje), la función objetivo del problema se vuelve no convexa, no lineal y discontinua.

La función objetivo

En la Figura 8, se observa que la función objetivo minimiza el costo de viaje total ponderado entre la ubicación de la instalación y los puntos de demanda en la región factible.

Modelo minimizar costos de viaje entre ubicación de instalación y puntos de demanda en región factible.

$$\min_{X \in F} Z(x) = \sum_{m=1}^M W_m C(X, X_m)$$

Ecuación 4

Para la creación del algoritmo, se rige de acuerdo al plano donde se desea tener en cuenta para las ubicaciones; para calcular las formas de menor costo entre dos ubicaciones X_i y X_j , $i, j \in K$, se debe encontrar que los costos de acceso directo dados en d_{ij} son el costo de ir del punto i al punto j sin alargar el camino para llegar otro punto (llamado punto intermedio).

Algoritmo 1. Cálculo de las rutas de menor costo

Este algoritmo es un algoritmo de tiempo polinómico que encuentra los caminos más cortos de todos los pares en un gráfico. La ventaja de usar el Algoritmo 1 es que una vez que se implementa, la información sobre las rutas de menor costo

entre todos los pares de puntos está disponible y se puede usar varias veces sin volver a calcular los costos.

Algoritmo de calcular rutas de menor costo.

input : Todos X_i locación, $\forall i \in K$

output : las formas de ruta de menor costo, $C(X_i, X_j, \forall i, j \in K$

foreach i, j pares en K **do** $C(X_i, X_j) \leftarrow d_{ij}$ / inicialización

for $v \leftarrow M + 1$ **to** $M + V$ **do**

foreach i, j pairs $\in K$ **do**

C

Algoritmo 2. Cálculo de función objetivo

Muestra cómo se encuentra el valor de la función objetivo.

Algoritmo valor función objetivo.

input: una solución para el punto X

output: valor de la función objetivo de X

1 $Z(X) \leftarrow 0$

2 **for** $m \leftarrow 1$ **to** M **do**

3 **for** $v \leftarrow M + 1$ **to** $M + V$ **do**

4 calcular d_{0m} y d_{0v} de (3)

5 $C(X, X_m) \leftarrow \min\{d_{0m}, d_{0v} + C(X_v, X_m)\}$

6 $Z(X) \leftarrow Z(X) + w_m C(X, X_m)$

7 **return** $Z(X)$

Algoritmo 3. Procedimiento check()

En la Figura 11, se observa el algoritmo *check* que trata de investigar una solución X y la repara cuando es necesario.

Algoritmo irocedimiento *check*

requires: una solución en el punto X

ensures: X es factible

1 **if** X es exterior del casco convexo rectangular de los puntos de instancia **then**

2 $X \leftarrow$ la proyección más cercana de X sobre el casco convexo rectangular

3 **else**

4 **foreach** región $r \in R$ **do**

```

5      if  $X \leftarrow \text{está dentro de la región } r$  then
6           $X \leftarrow \text{la proyección más cercana de } X \text{ sobre la región } r$ 's
7          go to 8
8      return  $X$ 

```

Algoritmo 4. Procedimiento búsqueda local LS()

La búsqueda local (LS) se realiza mediante la función LS () dada en Algoritmo 4. El procedimiento Check () se realiza junto con LS para que evite generar cualquier ubicación inviable o atípica.

Algoritmo procedimiento búsqueda local.

```

input    : un punto de solución  $X$  y tamaño del conjunto  $s$ 
output   : un el mejor punto de solución en conjunto de  $X$ 

1 genera una solución aleatoria  $Y$  en  $Nbr_s(X)$ 
2 Check( $Y$ ) // verificar los procedimientos de reparación
3 if  $Z(Y) < Z(X)$  then return  $Y$            // una mejor solución se encuentra
alrededor de  $X$ 
4 else return  $X$                            // no pudo mejorar  $X$ 

```

Este documento introdujo un tipo general de problema de ubicación plana restringida donde las restricciones son impuestas por regiones congestionadas. Todos los problemas de ubicación plana restringida estudiados hasta ahora en la literatura son casos especiales del problema general.

7.2 LAS DECISIONES DE UBICACIÓN DE INSTALACIONES EN LA CADENA DE SUMINISTRO

La publicación realizada por los autores Raúl Humberto Araneda y Reinaldo Javier Moraga,³² mostró la importancia de la decisión de localización en el diseño de la cadena de suministro haciendo revisión de dos modelos de localización clásicos como P-Center y P-Mediana.

Los modelos se pueden clasificar de acuerdo a su distancia, modelos en su máxima distancia y modelos en distancia total o promedio.

El modelo P-Center pertenece al modelo de máxima distancia, la función de este modelo es minimizar la máxima distancia entre un nodo con mayor demanda y la facilidad más cercana. Conocido este modelo como problema mínimax y como un problema punto objetivo, ya que minimiza la distancia desde cada localización de demanda al sitio de la facilidad como un objetivo separado; por lo tanto, hay

³² ARANEDA, Raúl Humberto y MORAGA, Reinaldo Javier. La decisión de localización en la cadena de suministro. Revista Ingeniería Industrial [en línea]. 2004, no.1 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/144>.

un objetivo para cada localización de demanda.

I = conjunto de los nodos de demanda i .

J = conjunto de las localizaciones candidatas de las facilidades j .

d_{ij} = distancia entre la demanda nodo i y su facilidad candidata localizada en el sitio j . h_i = demanda del nodo i .

p = número de facilidades para localizar. Definiendo las siguientes variables de decisión:

$X_j = 1$, si se localiza en el sitio j ; 0, en otro caso. Γ_{ij} .

Y_{ij} , si la demanda del nodo i es asignada a la facilidad ubicada en el sitio j ; 0, en otro.

caso.

W = máxima distancia entre un nodo de demanda y su facilidad a la cual el nodo es asignado.

El p -centro puede ser formulado como se observa a continuación.

Modelo p -centro

$$\text{Min } W \quad (1.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} x_j = p \quad (1.2)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1.3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.4)$$

$$W - \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (1.5)$$

$$X_j \in \langle 0, 1 \rangle \quad \forall j \in J \quad (1.6)$$

$$Y_{ij} \in \langle 0, 1 \rangle \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.7)$$

Ecuación 5

La función objetivo

1.1 Minimiza la máxima demanda-distancia entre cada nodo de demanda y la facilidad seleccionada más cercana.

1.2 Establece que existen p número de facilidades para ser localizadas.

1.3 Requiere que cada nodo de demanda sea asignado exactamente a

sólo una facilidad.

1.4 Solo permite que la demanda de un nodo sea asignada a una facilidad abierta, esto es una facilidad seleccionada.

1.5 Estipula que la máxima distancia entre el nodo i y la facilidad en el sitio j , denotado por W es más grande que la distancia entre cualquier nodo i y la facilidad localizada en el sitio j .

El conjunto de restricciones (1.6) y (1.7) establecen la naturaleza binaria de las variables de decisión.

7.3 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL ALGORITMO

El objetivo del modelo es identificar las localizaciones de las plataformas CD de los CEDIS y de los almacenes intermedios, como también las cantidades enviadas entre los diversos puntos que minimizan los costos totales fijos y variables. A continuación, se presenta la formulación del modelo:

m = número de puertos(i)

p = número de posibles localizaciones de plataformas Cross – Docking(h)

q = número de posibles localizaciones de centros de distribución(k)

r = número de posibles localizaciones de almacenes intermedios(l)

n = número de destinos(j) -están agrupados por clúster, con un mix de productos y cantidades demandadas-

Parámetros del modelo

D_j = Demanda anual del destino j -cada destino agrupado en clúster, con un mix de productos y cantidades demandada

S_i = Capacidad potencial de suministro de cada puerto i

K_h = Capacidad potencial de la plataforma Cross – Docking h

R_k = Capacidad potencial de los centros de distribución k

W_l = Capacidad potencial del almacén intermedio en el sitio l

F_h = Costo fijo de localizar y acondicionar una plataforma CD en el sitio h

F_k = Costo fijo de localizar y acondicionar un centro de distribución en el sitio k

f_l = Costo fijo de localizar y acondicionar un almacén intermedio en el sitio l

C_{ih}

= Costo de enviar una unidad del puerto i a la plataforma CD ubicada en h

C_{ik} = Costo de enviar una unidad del puerto i al CEDI ubicado en el sitio k

C_{il}

= Costo de enviar una unidad del puerto i al almacén intermedio ubicado en l

C_{ij} = Costo de enviar una unidad del puerto i directo al cliente j

C_{hk} = Costo de enviar una unidad de la plataforma CD h al CEDI ubicado en k

C_{hl}

= Costo de enviar una unidad de la plataforma CD h al almacen intermedio en l

C_{hj} = Costo de enviar una unidad de la plataforma CD h al cliente j

C_{kh} = Costo de enviar una unidad del CEDI k a la plataforma CD ubicada en h

C_{kl}

= Costo de enviar una unidad del CEDI k al almacén intermedio ubicado en l

C_{kj} = Costo de enviar una unidad del CEDI k al cliente j

C_{lj} = Costo de enviar una unidad del almacén intermedio l al cliente j

Variables

x_{ih}

= Variable que indica la cantidad enviada del puerto i a la plataforma CD en h

x_{ik}

= Variable que indica la cantidad enviada del puerto i al CEDI ubicado en k

x_{il}

= Variable que indica la cantidad enviada del puerto i al almacén intermedio l

x_{ij} = Variable que indica la cantidad enviada del puerto i directo al cliente j

x_{hk}

= Variable que indica la cantidad enviada de la plataforma CD h al CEDI k

x_{hl}

= Variable que indica la cantidad enviada de la plataforma CD h al alm. interm. l

x_{hj}

= Variable que indica la cantidad enviada de la plataforma CD h al cliente j

x_{kh}

= Variable que indica la cantidad enviada del CEDI k a la plataforma CD en h

x_{kl}

= Variable que indica la cantidad enviada del CEDI k al almacén intermedio l

x_{kj} = Variable que indica la cantidad enviada del CEDI k al cliente j

x_{lj}

= Variable que indica la cantidad enviada del almacén intermedio l al cliente j

y_h

= var. binaria que vale 1, si se localiza la plataforma CD en h y 0, en otro caso

y_k = var. binaria que vale 1, si se localiza el CEDI en k y 0, en otro caso

y_l

= var. binaria que vale 1, si se localiza el alm. intermedio en l y 0, en otro caso

Modelo

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_{h=1}^p F_h y_h \\
 & + \sum_{k=1}^q F_k y_k \\
 & + \sum_{l=1}^r f_l y_l \\
 & + \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^p C_{ih} x_{ih} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^q C_{ik} x_{ik} + \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^r C_{il} x_{il} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \\
 & + \sum_{h=1}^p \sum_{k=1}^q C_{hk} x_{hk} \\
 & + \sum_{h=1}^p \sum_{l=1}^r C_{hl} x_{hl} \\
 & + \sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n C_{hj} x_{hj} \\
 & + \sum_{k=1}^q \sum_{h=1}^p C_{kh} x_{kh} + \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r C_{kl} x_{kl} + \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^n C_{kj} x_{kj} + \sum_{l=1}^r \sum_{j=1}^n C_{lj} x_{lj}
 \end{aligned}$$

Ecuación 6

Sujeto a:

Restricción de capacidad de envío del puerto

$$\sum_{h=1}^p x_{ih} + \sum_{k=1}^q x_{ik} + \sum_{l=1}^r x_{il} + \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i$$

Ecuación 7

$$\sum_{k=1}^q x_{hk} + \sum_{l=1}^r x_{hl} + \sum_{j=1}^n x_{hj} \leq K_h y_h$$

Ecuación 8

$$\sum_{h=1}^p x_{hk} + \sum_{l=1}^r x_{kl} + \sum_{j=1}^n x_{kj} \leq R_k y_k$$

Ecuación 9

$$\sum_{j=1}^n x_{lj} \leq W_l y_l$$

Ecuación 10

$$\sum_{i=1}^m x_{ih} - \left[\sum_{k=1}^q x_{hk} + \sum_{l=1}^r x_{hl} + \sum_{j=1}^n x_{hj} \right] \geq 0$$

Ecuación 11

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} - \left[\sum_{h=1}^p x_{kh} + \sum_{l=1}^r x_{kl} + \sum_{j=1}^n x_{kj} \right] \geq 0$$

Ecuación 12

$$\sum_{i=1}^m x_{il} - \sum_{j=1}^n x_{lj} \geq 0$$

Ecuación 13

$$\sum_{k=1}^q x_{kh} - \left[\sum_{l=1}^r x_{hl} + \sum_{j=1}^n x_{hj} \right] \geq 0$$

Ecuación 14

$$\sum_{k=1}^q x_{kl} - \sum_{j=1}^n x_{lj} \geq 0$$

Ecuación 15

$$\sum_{h=1}^p x_{kh} - \left[\sum_{l=1}^r x_{kl} + \sum_{j=1}^n x_{kj} \right] \geq 0$$

Ecuación 16

$$\sum_{h=1}^p x_{hl} - \sum_{j=1}^n x_{lj} \geq 0$$

Ecuación 17

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} + \sum_{k=1}^q x_{kj} + \sum_{h=1}^p x_{hj} + \sum_{l=1}^r x_{lj} = D_j$$

7.4 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

A continuación, se implementa el algoritmo de k-means y se determinan dos conjuntos de entrada. El primer conjunto de entrada con n registros está compuesta con las siguientes variables:

- $D(j)$, demanda del producto del j -ésimo cliente.

- $T(j)$, tiempo de servicio (incluye descarga y entrega del producto al j -ésimo cliente)

- $t_o(j)$, tiempo de inicio de la ventana de tiempo del j -ésimo cliente (este valor se estima en minutos)

- $t_f(j)$, tiempo de fin de la ventana de tiempo del j -ésimo cliente (este valor se estima en minutos).

- $coord_lat(j)$, coordenada latitud cliente j

- $coord_long(j)$, coordenada longitud cliente j

El segundo conjunto de entrada con m registros, está compuesta con las siguientes variables:

- $V(k)$, identificador del Vehículo k -ésimo

- $C(k)$, capacidad del Vehículo k -ésimo

SumaDemanda $\leftarrow 0$

SumaCapacidadVehículos $\leftarrow 0$

Para $j \leftarrow 1$ **hasta** n **hacer**

SumaDemanda \leftarrow SumaDemanda + $D(j)$

Fin Para

Para $k \leftarrow 1$ **hasta** m **hacer**

SumaCapacidadVehículos \leftarrow SumaCapacidadVehículos + $C(k)$

Fin Para

Para $k \leftarrow 1$ **hasta** 10 **hacer**

iteraciones $\leftarrow 0$

anteriorCentroide \leftarrow **Array**[]

Mientras iteraciones > MáximaIteraciones **or** viejoCentroide == k **hacer**

anteriorCentroide \leftarrow anteriorCentroide.**añadir**(k)

iteraciones \leftarrow iteraciones + 1

Fin Mientras

Repetir

```

Para i←1 hasta 10
    Para k←1 hasta n
        distance(k)←      raíz((coord_lat(k)-centroide.lat(i)
    )^2+(coord_long(k)-centroide.long(i) )^2)

    Fin Para
    mindistance(i)<-añadir(min(distance))

Fin Para
Fin Repetir

```

Fin Para

Después de implementar el algoritmo de k-means para calcular los clústeres de localización de los clientes se debe implementar el algoritmo de Ordering Points to Identify The Clustering Structure (OPTICS).

función OPTICS(nodos_puntos, minPuntos)

```

    Para i← 1 to longitud(nodos_puntos) hacer
        Si nodos_puntos[i].isProcessed Entonces
            llamar      expandirCI(nodos_puntos,nodos_puntos[i]
, minPuntos)
        Fin Si

```

Fin Para

Fin funcion

funcion expandirCI(nodos_puntos,nodo, minPuntos)

```

    error← 0.001
    vecinos← nodos_puntos.vecinos(nodo)
    nodo.esProcesado=VERDADERO
    nodo.distancia=Inf
    nodo.colocarDistanciaPrincipal(vecinos,error, minPuntos)
    Si nodo.distancia<>Inf Entonces
        llamar Semillas.modificar(vecinos,nodo)
        Mientras que Semillas.esteVacio() hacer
            semillaActual= Semillas.siguiente()
            vecinos← nodos_puntos.vecinos(semillaActual)
            semillaActual.esProcesado =VERDADERO

```

```

        semillaActual.colocarDistancia(vecinos,error, minPuntos)
        Si semillaActual.distancia_principal<>Inf Entonces
            Semillas.modificar(vecinos,semillaActual)
        Fin Si
    Fin Mientras
Fin Si

Fin funcion

funcion Semillas::modificar(vecinos,nodoCentral)
    distancia← nodoCentral.distancia_principal
    Para i→ 1 to longitud(vecinos) hacer
        Si vecinos[i].esProcesado Entonces
            nueva_distancia← max(distancia,nodoCentral.distancia(vecinos[i]))
            Si vecinos[i]. distancia= Inf Entonces
                vecinos[i].distancia← distancia
            Si No
                Si nueva_distancia<vecinos[i].distancia Entonces
                    vecinos[i].distancia← nueva_distancia
                Fin Si
            Fin si
        Fin Para
    Fin funcion

```

Optics K-Means brinda una solución para la localización de puntos y de la ubicación de un nuevo punto, adicionalmente presenta el cálculo de rutas, pero no necesariamente es la más óptima (ya que contiene cruces entre calles), la idea es obtener una ruta sin cruces para cumplir las restricciones de entrega.

Para encontrar una solución adecuada al problema de entrega de pedidos a los clientes (este problema está basado en el problema de TSP), se implementa el algoritmo de LS-2-Opt (Local search 2 opt) cuya entrada es la localización de clientes y una ruta de entrega (con cruces entre calles), la cual es la salida del algoritmo expuesto anteriormente.

Entrada un conjunto de puntos describiendo una ruta de entrega
 rutas=<C(1),C(2),C(3),...,C(n)>

```

Para i ← 1 hasta n-1 hacer
    Para j ← i+1 hasta n hacer

```

```

        Si  $j < n$  Entonces
            Si  $d(C(i), C(j+1)) + d(C(j), C(i+1)) < d(C(j), C(i+1)) + d(C(j), C(j+1))$  Entonces
                swap  $\leftarrow$  rutas[i]
                rutas[i]  $\leftarrow$  rutas[j]
                rutas[j]  $\leftarrow$  swap
            Fin Si
        Si no
            Si  $d(C(i), C(1)) + d(C(n), C(i+1)) < d(C(i), C(j+1)) + d(C(n), C(1))$ 
            Entonces
                swap  $\leftarrow$  rutas[i]
                rutas[i]  $\leftarrow$  rutas[n]
                rutas[n]  $\leftarrow$  swap
            Fin Si
        Fin Si
    Fin Para
Fin Para

```

Salida: La nueva ruta

La función **d()** evalúa la función de semiverseno para el cálculo de distancias.

7.5 CÁLCULO DE LA COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

Para la implementación de k-means, la complejidad computacional se restringe al hecho de comparar cada par de nodos en el conjunto de datos; en este caso, es $O(n^2)$ donde **n** es la cantidad de puntos en este caso de clientes.

Para la implementación de k-means OPTICS, se deben visitar los vecinos de cada nodo de consulta recorriendo todos los nodos por cada nodo central teniendo una complejidad de $O(n^2)$; el parámetro error es requerido para aumentar o disminuir la densidad de los clústeres que no afectan en el desempeño del algoritmo y aumentar la velocidad del algoritmo.

Para la implementación de la heurística de Local Search 2 Opt, se evalúa cada par de puntos para calcular la distancia entre ellos usando la función de semiverseno (espacio no euclidiano), teniendo una complejidad de $O(n^2)$.

Para calcular la complejidad computacional, se suman las complejidades computacionales de los algoritmos $O(n^2) + O(n^2) + O(n^2)$, dando como resultado $O(n^2)$.

8 METODOLOGÍA

La metodología que más se ajusta al problema y objetivo es cuantitativa, puesto que, al tratarse de un algoritmo matemático, las pruebas arrojaron resultados cualitativos y cuantitativos; de esta manera, realizar un análisis de funcionamiento y comparación.

Por esta razón, se desarrollará un experimento, en la cual, para su primera fase, se desarrollará la evaluación de posibles alternativas de desarrollo y solución al problema planteado.

Luego de ello, y de acuerdo a los datos encontrados en la fase previa, se ajustarán las diferentes variables y restricciones del modelo planteado, para que, al momento de diseñar el algoritmo, se garantice que este cumple con todos los requisitos necesarios para solucionar de forma ideal la problemática.

El desarrollo del algoritmo es una fase crucial del experimento, ya que en ella se debe implementar un mayor esfuerzo al momento de unificar los conocimientos adquiridos en cada una de las fases previas, para así poder brindar la mejor solución posible a la problemática planteada al inicio del documento.

Posterior de programar el algoritmo, y su procesamiento, se deben visualizar y entregar los resultados obtenidos de la forma más idónea.

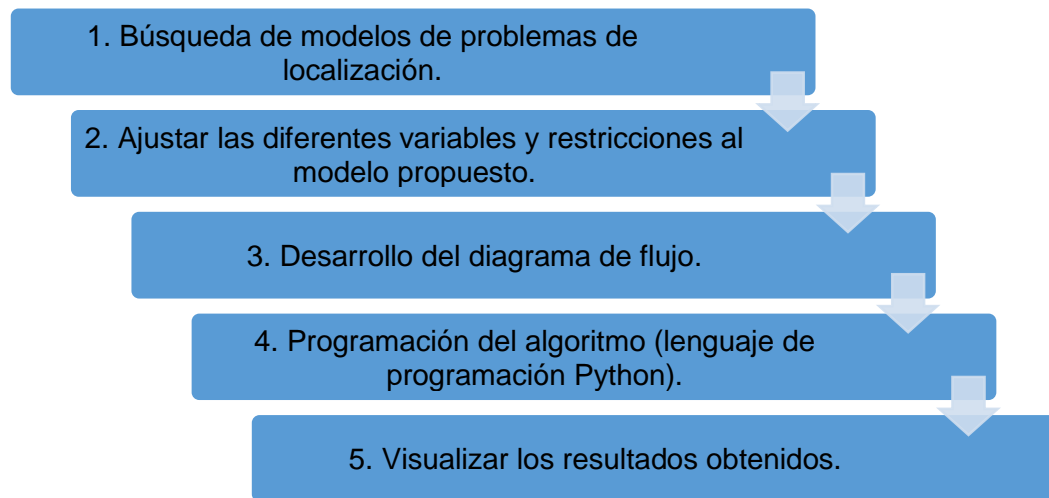


Figura 15. Flujo metodológico

Fuente: elaboración propia

9 CONCLUSIONES

9.1 OBJETIVO 1

A lo largo de los últimos cinco años de investigación sobre los estudios de cadena de suministros, se han evidenciado la mala toma de decisiones de localización en CEDIS. Esto ha provocado interés en minimizar costos y maximizar tiempos con una metodología CD, de gran flujo, adecuación y preparación de pedidos para cumplir con tiempos apropiados manejando la situación con comidas perecederas a tiempo.

Para dicho combinación de problema, se encontró investigaciones y documentación de varios algoritmos híbridos heurísticos. Se concluye que son propuestos para su efectividad de resolver problemas de localización, la forma de los algoritmos híbridos combina la optimización de multitud de partículas multiobjetivo adaptado y la búsqueda de vecindario variable multiobjetivo adaptada, considerando procedimientos y diseños para manejar decisiones de ubicación y dimensionamiento para encontrar soluciones óptimas.

9.2 OBJETIVO 2

Un algoritmo heurístico produce mejores soluciones que un algoritmo implementado por fuerza bruta, debido a que explora un espacio de soluciones mayor, debido a que no se encierra únicamente a la secuencia de datos de entrada si no que gracias a la optimización en un óptimo local hace que explore la región del problema, encontrando así mejores soluciones.

Una combinación entre los algoritmos de k-means, k-means OPTICS y local search 2opt permite obtener una solución factible para el problema de TSP(Travelling Salesman Problem), en el cálculo de nueva localizaciones de puntos y cálculo en el ruteo de vehículos con capacidades y ventanas de tiempo definidas considerando la demanda.

Un algoritmo basado en inteligencia artificial como lo es K-Means OPTICS mejora su rendimiento al añadir la fase de local search 2 opt, creando así un algoritmo híbrido (algoritmo voraz y heurístico) para el cálculo de nuevas localizaciones y cálculo de rutas visitando todos los clientes.

9.3 OBJETIVO 3

Los procesos computacionales están limitados por recursos de memoria y espacio en disco, exponiendo una síntesis en el cálculo de rutas bajo el problema de TSP, cuya complejidad computacional es NP, reduciéndolo a complejidad polinomial y brindando una solución adecuada a los problemas de ventanas de tiempo y restricciones en capacidad para la entrega de productos a los clientes.

10 CRONOGRAMA

Tabla 2. *Cronograma*

Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha final	Duración(días)
Titulo	25/09/2020	28/09/2020	3
Introducción	28/09/2020	2/10/2020	4
Planteamiento del problema.	2/10/2020	5/10/2020	3
Objetivos	5/10/2020	10/10/2020	5
Metodología	10/10/2020	12/10/2020	2
Bibliografía	12/10/2020	13/10/2020	1
Alternativa	13/10/2020	15/10/2020	2
Marco de referencia	15/10/2020	20/10/2020	5
Marco teórico	20/10/2020	23/10/2020	3
Marco conceptual	23/10/2020	25/10/2020	2
Alcances y limitaciones	25/10/2020	29/10/2020	4
Cronograma de actividades	29/10/2020	3/11/2020	5
Productos a entregar	3/11/2020	7/11/2020	4
Instalaciones y equipo requerido	7/11/2020	11/11/2020	4
Presupuesto del trabajo	11/11/2020	13/11/2020	2
Estrategias de comunicación y divulgación	13/11/2020	15/11/2020	2
Estado del arte	10/10/2020	15/11/2020	36

Fuente: elaboración propia

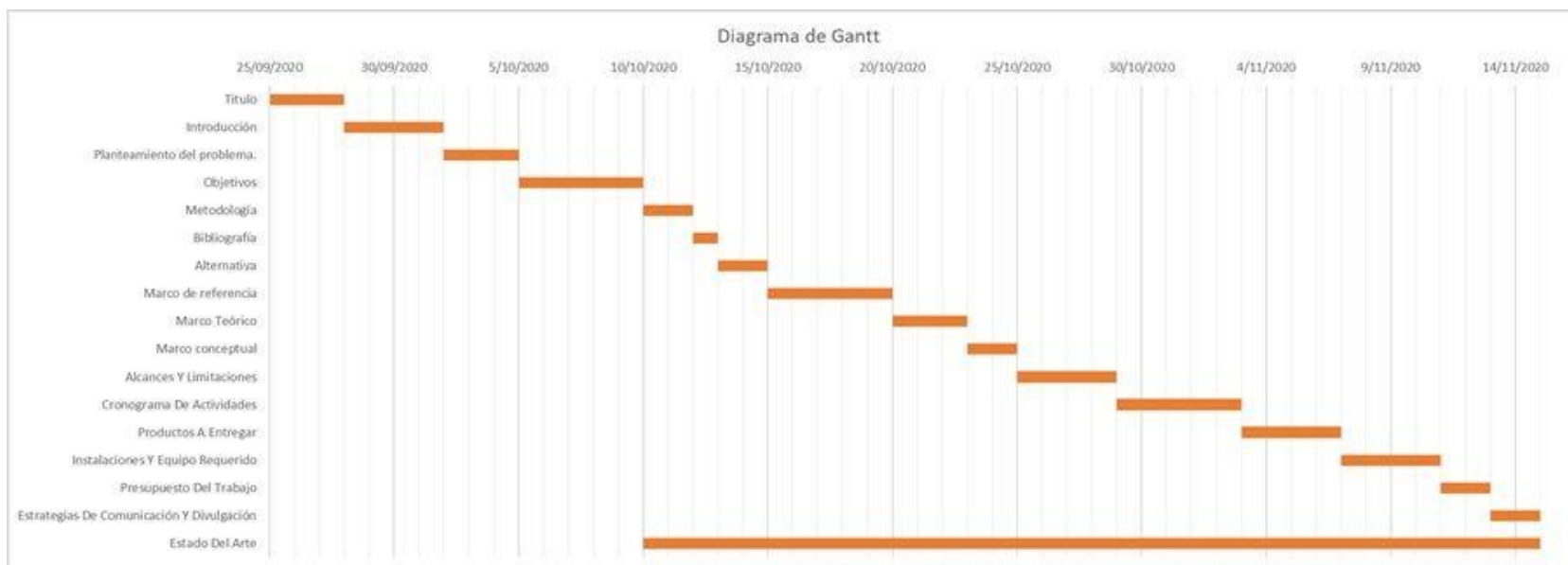


Figura 16. Diagrama de Gantt

Fuente: elaboración propia

11 PRODUCTOS A ENTREGAR

Tabla 3. *Productos a entregar*

Productos a entregar		
Tipo	Nombre del producto	Fecha de entrega
Algoritmo	Implementación algoritmo	17/12/2020
CSV	Archivo input con información de clientes para proceso del algoritmo	17/12/2020
Artículo	localización con metodología CD	17/12/2020
Documento	Trabajo de grado	17/12/2020

Fuente: elaboración propia

12 INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO

Computador con sistema operativo Windows 10 a 64 bits, RAM de 4 Gb. Software Python.

13 PRESUPUESTO DEL TRABAJO

Tabla 4. *Presupuesto global del anteproyecto*

Presupuesto global del anteproyecto		
	Ingresos	Egresos
Ingresos		
Auxilio o patrocinio para la elaboración del trabajo	0	
Recursos propios	4 000 000	
Egresos		
Recurso humano: honorarios y servicios personales		1 000 000
Equipo (Carlos Sandoval)		0
Materiales (papelería, suministros, fotografías, etc.)		800 000
Viajes (transporte)		500 000
Pruebas de laboratorio		400 000
Imprevistos		500 000
Totales	4 000 000	3 200 000

Fuente: elaboración propia

14 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

15

- ANALYTICS VIDHYA. Introductory guide on linear programming for (aspiring) data scientists [en línea]. 2017 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/02/introductory-guide-on-linear-programming-explained-in-simple-english/>.
- ANONYMOUS. Logística almacenes Éxito [en línea]. 2014 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://almacenesexitologistica.blogspot.com/2014/05/logistica-almacenes-exito.html>.
- ARKANET. Logística [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://www.arkanet.mx/administrador/logistica.html>.
- BALCUCHO, José Alfredo y GUALDRÓN, Oscar Eduardo. Optimización de la base de reglas de un controlador difuso, mediante técnicas estocásticas como algoritmos genéticos y el simulated annealing. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada [en línea]. 2010, vol.2, no.16 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_16/27102011/10.pdf.
- BERNARDINO. Cross-docking: Funciones y Tipos [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://bernardinoabad.es/2019/07/26/cross-docking-funciones-y-tipos/>.
- BROWN, Ingrid Viviana; QUIROGA, Juan Pablo y GALLÓN, Fabián Andrés. Proyecto de trabajo de grado para el diseño de la red de valor para pescado fresco hacia las tiendas de CENCOSUD, Colombia en Cundinamarca. Trabajo de grado Especialista en Gerencia Logística en Redes de Negocios. Bogotá, D.C.; Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Administración de Empresas. Especialización en Gerencia Logística en Redes de Negocio, 2013.
- CHANG, Keliang; ZHOU, Hong; CHEN, Guijing y CHEN, Huiqin. Multiobjective location routing problem considering uncertain data after disasters. Discrete Dynamics in Nature and Society [en línea]. 2017, [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1155/2017/1703608>.
- FARHAM, Mohammad Saleh; SRAL, Haldun y IYIGUN, Cem. A column generation approach for the location-routing problem with time windows. Computers and Operations Research [en línea]. 2018, vol.90 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.09.010>.
- GARCÍA, Lucero y BAEZA, Roberto Configuración de la cadena de suministros y la cadena de valor para una phyme. Verano de la investigación Científica [en línea]. 2017, vol.3, no.2 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en

línea:

<http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2045/1539>.

GESTAL, Marcos. Introducción a los algoritmos genéticos [en línea]. 2018 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en internet: https://www.researchgate.net/publication/237812449_Introduccion_a_los_Algoritmos_Geneticos.

GUANGA, Alexander; MALAN, Mónica y ZUMBA, Jessica. Aplicación del método de ramificación y acotamiento en la empresa "Muebles Dormihogar" [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://es.slideshare.net/jessicazumba7/final-operativa>.

HANIK, Dean M. Industrial location theory. International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology [en línea]. 2017, vol.15 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0216>.

KOÇ, Çağrı; BELTAŞ, Tolga; JABALIB, Ola; LAPORTE, Gilbert. The fleer size and mix location-routing problem with time windows: Formulation and a heuristic algorithm. European Journal of Operational Research [en línea]. 2016, vol.248, no.1 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.082>.

LINKPANG. Ramificación y poda [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en internet: https://es.linkfang.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n_y_acotaci%C3%B3n.

MARKETING. La última frontera [en línea]. 2020 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: bit.ly/39DgObt.

MARTÍN-ANDINO, Ramón. Cadena de Suministro (SCM). Madrid: EOI Escuela de Negocios, 2006.

MOUJAHID, Abdelmalik; INAZA, Iñaki y LARRAÑAGA, Pedro. Tema 2. Algoritmos genéticos [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/t2geneticos.pdf>.

OBSERVATORIO DE LA EMPRESA MULTINACIONAL ESPAÑOLA [OEME]. Nota técnica: "Gestión de la cadena de suministros en un contexto de globalización" [en línea]. 2011 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://itemsweb.esade.es/research/oeme/notas/OEME-gestion-de-la-cadena-de-suministros.pdf>.

RODRÍGUEZ, Edgar Guillermo. Identificación de prácticas en la gestión de la cadena de suministro sostenible para la industria alimenticia. Revista Científica Pensamiento y Gestión [en línea]. 2018, no.45 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <http://dx.doi.org/10.14482/pege.41.9704>.

TQ CONFIABLE. Nosotros [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020].

- Disponible en línea: <https://www.tqconfiable.com/quienes-somos-home>.
- TQ CONFIABLE. TQ en Colombia [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020].
Disponible en línea: <https://www.tqconfiable.com/crossdocking>.
- UN GEÓGRAFO SIN GEOGRAFÍA. La Expansión Geográfica de Wal-Mart [en línea]. 2014 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://ungeografosingeografia.blogspot.com/2014/07/la-expansion-geografica-de-wal-mart.html>.
- UNKNOWN. Cross Docking [en línea]. 2015 [citado en noviembre de 2020].
Disponible en línea: <https://logisticaudea15.blogspot.com/2015/07/cross-docking-dada-la-busqueda-de-una.html>.
- VÁZQUEZ, Jair. Ingeniería en computación [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70265/secme-32643_1.pdf;jsessionid=1F0049E6E764B360280FE7DEFE53F654?sequence=1.
- WIKIPEDIA. Ramificación y poda [en línea]. s.f. [citado en noviembre de 2020].
Disponible en línea: https://es.wikipedia.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n_y_poda.
- WOGNUM, P. M.; BREMMERS, Harry; TRIENEKENS, Jacques H.; VAN DER VORST, Jack G. A. J. y BLOEMHOF, Jacqueline M. Systems for sustainability and transparency of food supply chains - Current status and challenges. Advanced Engineering Informatics [en línea]. 2011, vol.25 [citado en noviembre de 2020]. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.001>.